ليزا راندال

المادة المعتمة والديناصورات

الترابط المذهل في الكون

ترجمة: د. ابتسام بن خضراء









المادة
المعتمة
والديناصورات

الترابط المذهل في الكون

ليزا راندال

«مكتبة ♔ النخبة»



مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

الطبعة الأولى - الكويت 2021

DARK MATTER AND THE DINOSAURS

مؤسسة الكويت للتقدم العلمي

ISBN: 978-9921-719-09-3





صاحب السمو الشيخ نواف الأحمد الجابر الصباح

أمير دولة الكويت

رئيس مجلس إدارة مؤسسة الكويت للتقدم العلمي



سمو الشيخ مشعل الأحمد الجابر الصباح

ولي عهد دولة الكويت

المحتوى

المقدمة

"المادة المعتمة" Dark matter و"الديناصورات" Dinosaurs كلمتان نادراً ما تسمعهما معاً ربما باستثناء في الملعب، أو في نادٍ للألعاب الفانتازية، أو في فيلم لسبيلبرغ لم يُعرَض بعد. المادة المعتمة هي مادة مراوغة في الكون تتفاعل عن طريق الجاذبية مثل المادة العادية، ولكنها لا ترسل أو تمتص الضوء. يستشعر علماء الفلك تأثير جاذبيتها، ولكنهم لا يرونها مطلقاً. الديناصورات، في المقابل...أشك في أنني أحتاج إلى تفسير الديناصورات. كانت الفقاريات Vertebrates البرية هي المهيمنة في فترة زمنية تتراوح بين 231 و66 مليون سنة خلت.

على الرغم من أن كلاً من المادة المعتمة والديناصورات مذهلة بحد ذاتها، يمكنك أن تفترض بنحوٍ منطقي أن هذه المادة الفيزيائية اللامرئية وهذه الأيقونة البيولوجية لا ترتبطان كلتاهما بالأخرى على الإطلاق. وقد يكون الأمر كذلك. ولكن الكون بالتعريف هو وحدة واحدة ومن حيث المبدأ تتفاعل كل عناصره بعضها البعض. يستكشف هذا الكتاب سيناريو تخيلياً نقترح فيه أنا ومساعدِيَّ أن المادة المعتمة قد تكون مسؤولة بنحو كامل (وغير مباشر) عن انقراض الديناصورات.

بيّن الفيزيائيون والجيولوجيون وعلماء الأحافير أنه منذ 66 مليون سنة هبط من الفضاء على الأرض شيءٌ يصل عرضه على الأقل إلى 10 كم، ودمر الديناصورات البرية، إضافة إلى ثلاثة أرباع الكائنات الموجودة على الكوكب. قد يكون هذا الشيء مذنَّباً آتياً من المشارف الخارجية للمجموعة الشمسية، ولكن لا أحد يعلم لمَ خرج هذا المذنب عن مداره المقيد تقيدا ضعيفا، ولكن المستقر، على الرغم من ذلك.

يقول عرضنا إنه في أثناء مرور الشمس عند المستوى المنصِّف Midplane لمجرة درب التبانة Milky Way – حزام النجوم والغبار اللامع الذي تراه في سماء ليلة صافية – تعرضت المجموعة الشمسية لقرص من المادة المعتمة أخرجت هذا الشيء البعيد عن مساره، من ثم سرَّعت من هذا التصادم الكارثي. في محيطنا المجري، تحيطنا المادة المعتمة بهالة كروية رقيقة ومنتشرة انتشارا هائلا.

إن نوع المادة المعتمة التي أدت إلى فناء الديناصورات سيكون موزَّعاً بنحوٍ مختلف تماماً عن معظم المادة المعتمة المراوغة في الكون. فالنوع الإضافي من المادة المعتمة سيترك الهالة سليمة، ولكن تفاعلاتها المختلفة سيجعلها تتكثف إلى قرص – تماماً في وسط درب التبانة. قد تكون هذه المنطقة الرقيقة كثيفة جداً إلى درجة أنه عندما تمر المجموعة الشمسية من خلالها- بينما تهتز الشمس إلى الأعلى والأسفل في مدارها ضمن مجرتنا- تقذف المذنبات الشاردة إلى خارج المجموعة الشمسية أو – الأهم من ذلك – تدفعها إلى داخل المجموعة الشمسية، حيث من الممكن أن تضرب الأرض.

أقول منذ البداية إنني لا أعلم حتى الآن ما إذا كانت هذه الفكرة صحيحة. إنما هي فقط نوع غير متوقع من المادة المعتمة التي تحمل تأثيراً قابلاً للقياس في الكائنات الحية (حسناً، تقنياً لم تعد حية الآن). هذا الكتاب هو قصة عرضنا غير التقليدي للمادة المعتمة الفعالة بنحو مفاجئ.

ولكن هذه الأفكار التنبُّئية- على الرغم من أنها أفكار مثيرة – ليست التركيز الأساسي للكتاب. على الأقل، المهم في محتوياته قصة المذنب المبيد للديناصورات، وكذلك السياق والعلم الكامنان وراءها، وهي

تتضمن إطاراً كونياً مبنياً بشكل أفضل وفهم أعمق للمجموعة الشمسية. أشعر بأنني محظوظة لأن المواضيع التي أدرسها بنحو متكرر توجه بحثي نحو أسئلة كبيرة مثل مم تصنع الأشياء، وطبيعة المساحة والوقت، وكيف تطور الكون Universe إلى العالَم World الذي نراه اليوم. في هذا الكتاب، آمل أن أتناقش معك حول كثير من هذه الأسئلة أيضاً.

قادتني دراساتي في البحث الذي سأصفه إلى طريق بدأت فيه بالتفكير بنحو أعم في الكوزمولوجيا (علم الكونيات) والفيزياء الفلكية والجيولوجيا وحتى البيولوجيا. كان التركيز لا يزال على الفيزياء الأساسية. ولكن لأنني اشتغلت كثيرا بفيزياء الجسيمات التقليدي طوال حياتي – دراسة وحدة بناء الأشياء المألوفة مثل الورق أو الشاشة التي تقرأ منها هذا الكتاب – رأيت من الممتع أيضاً الغوص في المجهول – وما سيكون معلوماً عما قريب – عن العالم المعتم، إضافة إلى تضمينات العمليات الفيزيائية الأساسية على المجموعة الشمسية والأرض.

يصف كتاب "المادة المعتمة والديناصورات" معرفتنا الحالية للكون، مجرة درب التبانة، والمجموعة الشمسية، إضافة إلى ما قد يكون منطقة قابلة للحياة والحياة على الأرض. سأناقش موضوع المادة المعتمة والكون، ولكني سأغوص أيضاً في المذنبات والكويكبات ونشوء الحياة وانقراضها، بتركيز خاص على المواد التي سقطت على الأرض فقتلت الديناصورات البرية – والكثير من الحياة الباقية. أردت أن يوصل هذا الكتاب الترابطات المدهشة الكثيرة التي أوصلتنا إلى هنا؛ حتى نفهم ما يجري الآن بنحوٍ أعمق. عندما نفكر في كوكبنا اليوم، ربما نريد أن نفهم أكثر السياق الذي تطور فيه أيضاً.

عندما بدأت التركيز على المفاهيم المتضمنة للأفكار الموجودة في هذا الكتاب، لم أكن مسحورة ومذهولة بمعرفتنا الحالية لبيئتنا – المحلية، الشمسية، المجرية، والكونية – فحسب، ولكن بمدى رغبتنا اللامتناهية في الفهم، من مكاننا الضئيل هنا على الأرض. كما كنت مأخوذة بالترابطات الكثيرة بين الظواهر التي سمحت لنا بالوجود أخيراً على الأرض. للتوضيح، فكرتي ليست من وجهة نظر دينية. ولا أشعر بالحاجة إلى تحديد هدف أو معنى. مع ذلك لا يسَعُني إلا أن أشعر بالعواطف التي تميل إلى تسميتها عواطف دينية عندما نصل إلى فهم امتداد الكون، وماضينا، وكيف أن كل شيء يتلاءم بعضُه مع بعض، فهو يمنحنا منظوراً معيناً عندما نتعامل مع سخافة الحياة اليومية.

جعلني هذا البحث الجديد أنظر بنحو مختلف إلى العالم وإلى أجزاء الكون التي كوّنت الأرض – وكوّنتنا. أثناء نشأتي في كوينز رأيت الأبنية المدهشة لمدينة نيويورك، ولكن القليل من الطبيعة. مشاهد الطبيعة القليلة التي رأيتها كانت عبارة عن حدائق ومروج – محافظة على القليل من الطبيعة التي كانت هنا قبل مجيء البشر. مع ذلك، عندما تمشي على الشاطئ، إنما أنت تمشي على سطح من المخلوقات – أو على الأقل أغطيتها الواقية. تتكون الجروف الكلسية التي قد تراها على الشاطئ أو في الريف من كائنات كانت حية في الماضي، منذ ملايين السنين. نشأت الجبال من تصادم صفائح تكتونية Tectonic plates، والصهارة (الماغما) Magma الذائبة التي تحرك هذه التحركات هي نتيجة مادة مشعة مدفونة بالقرب من نواة الأرض. جاءت طاقتنا من العمليات النووية للشمس – رغم تحويلها وتخزينها بطرق مختلفة منذ أن حدثت هذه التفاعلات النووية الأولية. عديدٌ من الموارد التي نستخدمها هي عناصر ثقيلة جاءت من الفضاء الخارجي، أسقطتها الكويكبات والمذنبات على سطح الأرض. كذلك أسقطت النيازك بعض الأحماض الأمينية Amino acids أيضاً، ربما جالبة بذلك الحياة – أو بذرة الحياة – إلى كوكب الأرض. وقبل أن يحدث أي شيء من هذا، انهارت المادة المعتمة إلى كتل شدت جاذبيتها مواد أخرى – تحولت بالنتيجة إلى مجرات، وعناقيد مَجَرِّية ونجوم مثل نجم الشمس. لا تروي المواد العادية – بقدر أهميتها بالنسبة إلينا – قصة الحياة كاملة.

على الرغم من أننا قد نعيش وهْمَ البيئة المكتفية ذاتياً، نتذكر عند كل شروق شمسٍ في النهار وعند كل بزوغ قمر ونجوم في الليل أن كوكبنا ليس وحده. السدم والنجوم هي الدليل على وجودنا في مجرة تقع داخل كون أوسع. نحن ندور داخل مجموعة شمسية حيث تذكرنا فصولها باتجاهنا وموقعنا فيها. كما يمثل قياسنا للوقت من حيث الأيام والسنون ارتباطنا بمحيطنا.

* * *

تبرز لي أربعة دروس ملهمة من بحثي وقراءاتي أردت أن أشاركها مع الآخرين، والتي أدت إلى هذا الكتاب. ففهم الطرق المدهشة التي ترتبط بها أجزاء الكون هو من الأمور العزيزة عندي جدا. الدرس الأكبر في المستوى الجوهري هو أن فيزياء الجسيمات الأولية، وفيزياء الكون، وبيولوجيا الحياة بحد ذاتها جميعها تترابط – ليس بمفهوم العصر الحديث، ولكن بطرق مذهلة تستحق الفهم.

تضرب أشياء من الفضاء الخارجي الأرض طوال الوقت. مع ذلك ترتبط الأرض مع بيئتها بعلاقة حب وكراهية. يستفيد الكوكب من بعض الأشياء المحيطة بنا، ولكن يمكن لمعظمها أن تكون مميتة. يعطي موقع كوكبنا الحرارة المناسبة، وتحرف الكواكب الخارجية Outer planets معظم الكويكبات والمذنبات الآتية قبل أن تضرب الأرض، كما أن المسافة بين القمر والأرض توازن مدارنا بقدرٍ كافٍ لتحد من التغير الحاد في درجات الحرارة، فضلاً عن أن النطاق الخارجي للمجموعة الشمسية يحمينا من الأشعة الكونية Cosmic rays الخطرة. لعل النيازك التي ضربت الأرض قد أودعتها مواردَ مهمة للحياة، لكنها أثرت في المقابل في مسار الحياة على الكوكب بطرق أكثر ضرراً. على الأقل أدى سقوط مثل هذه المادة إلى انقراض مدمر قبل 66 مليون سنة، على الرغم من أنها محقت الديناصورات البرية، إلا أنها مهدت الطريق لوجود ثدييات أكبر، من ضمنها نحن البشر.

النقطة الثانية – المدهشة أيضاً – هي حداثة عديد من التطورات العلمية التي سأناقشها. ربما يستطيع الناس التصريح بالعبارة التالية في أي حقبة من التاريخ الإنساني، ولكن ذلك لا ينفي صحتها: لقد طورنا معرفتنا بنحوٍ هائل خلال [هنا أدخل رقماً بحسب السياق] السنوات الماضية. بالنسبة إلى البحث الذي سأصفه، عدد السنوات هو أقل من خمسين. بينما كنت أباشر بحثي، وأقرأ أبحاث الآخرين، كنت أُدهشُ باستمرار من حداثة وثورية الاكتشافات الجديدة العديدة. وظهرت عبقرية الإنسان ومكابرته في محاولة العلماء مواكبةَ الأشياء المفاجئة عادة، والمسلية دائماً، والمخيفة أحياناً، التي علمناها عن العالم من حولنا. العلم الذي يقدمه هذا الكتاب هو جزء من تاريخ أكبر – 13.8 أو 4.6 بليون سنة بحسب ما إذا كنت تركز على تاريخ الكون أو المجموعة الشمسية. لكن، يعود التاريخ الإنساني الذي يكشف عن هذه الأفكار إلى قرن ونيف.

انقرضت الديناصورات قبل 66 مليون سنة، ولكن علماء الأحياء والأحافير استنتجوا طبيعة هذا الانقراض فقط في سبعينات وثمانينات القرن الماضي. وعلى إثر تقديم الأفكار، لم يستغرق الأمر سوى عقود من الزمن قبل أن يقدم مجتمع العلماء هذه الأفكار ضمن إطار مكتمل الجوانب. كما أن التوقيت لم يكن مصادفة محضة. إذ إن ارتباط الانقراض بمادة من الفضاء الخارجي أصبح أكثر مصداقية عندما هبط رواد الفضاء على القمر ورأوا من قربٍ الحُفَرَ- التي قدمت لهم دليلاً مفصلاً عن الطبيعة الديناميكية للمجموعة الشمسية.

خلال السنوات الخمسين الماضية، علمتنا اكتشافات مهمة في فيزياء الجسيمات والكونيات أشياء عن النموذج المعياري Standard Model، الذي يصف العناصر الأساسية للمواد كما ندركها اليوم. كما ثُبِّت مقدار المادة المعتمة والطاقة المعتمة في الكون في العقود الأخيرة فقط من القرن العشرين. لقد تغيرت معرفتنا للمجموعة الشمسية أيضاً خلال الفترة الزمنية نفسها. وفي تسعينات القرن العشرين فقط اكتشف العلماء أجسام حزام كويبر Kuiper belt في محيط بلوتو، مما يبين أن بلوتو لا يدور وحده. كما قل عدد الكواكب – فقط لأن العلوم التي تعلمتها في المدارس أصبحت أثرى وأكثر تعقيداً.

يتمحور الدرس الرئيس الثالث حول معدل التغيير. يتيح الانتخاب الطبيعي Natural selection التكيف Adaptation عندما يكون للأنواع Species الوقت الكافي للتطور، ولكن هذا التكيف لا يتضمن التغيرات الجذرية. فهو بطيء جداً. لم تكن الديناصورات مستعدة للتكيف مع نيزك بعرض عشرة كيلومترات يضرب الأرض. لذلك لم يكن للبرية منها، التي كانت أضخم، بدٌّ من أن تدفن نفسها مختبئة في جحر.

مع ظهور أفكار وتقنيات جديدة، أدت المناقشات حول التغير الكارثي في مواجهة التغير التدريجي دوراً مهماً. إن المفتاح لفهم أكثر التطورات حداثة – سواء علمية أو غير ذلك – هو سرعة العمليات التي تصفها. أسمع الناس مراراً يقترحون أن تطورات معينة، مثل دراسات في علم الوراثة أو اكتشافات مستمدة من الإنترنت، هي تغيرات دراماتيكية بنحو غير مسبوق. ولكن هذا ليس صحيحاً تماماً. إن الفهم المتطور للأمراض أو للجهاز الدوري، والذي يعود إلى مئات السنين، قدم تغيرات عميقة على الأقل بقدر علم الوراثة اليوم. كما أثر ابتكار اللغة المكتوبة، ولاحقاً الطباعة، في طريقة اكتساب الناس للمعرفة وفي طريقة تفكيرهم مستخدمين أساليب مهمة بقدر أهمية الطرق التي قدمها الإنترنت.

كما هي الحال في هذه التطورات، العامل المهم للتغير الجاري هو سرعته – وهو موضوع متعلق ليس فقط بالعمليات العلمية، بل بالتغيرات البيئية والاجتماعية. على الرغم من أن الموت بسبب النيزك ليس قلقنا الأساسي اليوم، إلا أن معدلات التغيير المتسارعة في البيئة وفي الانقراض هي محل قلقنا – ويمكن أن يكون التأثير قابلاً للمقارنة بعدة أوجه. إن البرنامج الواضح لهذا الكتاب هو مساعدتنا بنحو أفضل على فهم القصة المذهلة عن طريقة وصولنا إلى هنا، وتشجيعنا على استخدام معرفتنا بحكمة.

إلى جانب ذلك، الدرس الرابع المهم هو العلم المدهش الذي يصف العناصر غير الظاهرة عادة التي تبني عالمنا وتطوره – والمقدار الذي نأمل بواسطته أن نفهم عن الكون. كثير من الناس معجبون بفكرة تعدد الأكوان Multiverse – أكوان أخرى خارج نطاق وصولنا. ولكن على الأقل، بقدر روعة العوالم الخفية العديدة – البيولوجية والفيزيائية- نحن نمتلك الفرصة لاكتشاف ومعرفة مزيد عنها. أتمنى أن أتمكن في كتاب المادة المعتمة والديناصورات من توصيل كم هو ملهم أن نتأمل ما نعرف – وما نتوقع أن نأمل اكتشافه في المستقبل أيضاً.

***

يبدأ هذا الكتاب بشرح علم الكوزمولوجيا – العلم الذي يُعنَى بتطور الكون إلى حالته الحالية. يقدم قسمه الأول نظرية الانفجار الكبير والتضخم الكوني ونشوء الكون. كما يشرح هذا القسم المادة المعتمة، وكيف تأكدنا من وجودها، ولِمَ هي مرتبطة ببنية الكون.

تؤلف المادة المعتمة 85% من المادة في الكون بينما المادة العادية – مثل تلك الموجودة في النجوم، والغاز، والناس – تشكل 15%. ومع ذلك ينشغل الناس بوجود وارتباط المادة العادية – التي، للحقيقة، تتفاعل بنحوٍ أقوى.

لكن، بالنسبة إلى الإنسانية، ليس من المنطقي أن نركز كل اهتمامنا على النسبة الصغيرة المؤثرة بنحوٍ غير متكافئ. فالـ 15% السائدة من المادة التي يمكننا أن نراها ونشعر بها هي فقط جزء من القصة. سوف أشرح الدور الحساس للمادة المعتمة في الكون – ودورها في المجرات وفي العناقيد المجرية المتشكلة من البلازما الكونية في بداية وجود الكون – وبالمحافظة على استقرار هذه البنى حتى اليوم.

يتعمق القسم الثاني من الكتاب في المجموعة الشمسية. بالطبع يمكن أن يكون موضوع المجموعة الشمسية محور كتاب كامل، إن لم يكن موسوعة كاملة. لذلك سأركز على الأمور التي تتعلق بالديناصورات – النيازك والكويكبات والمذنبات. سيصف هذا القسم الأشياء التي نعلم أنها ضربت الأرض وما نتوقع أن يضربها في المستقبل، إضافة إلى الدليل الضئيل ولكن غير القابل للرفض على الانقراض أو ضربات النيازك التي حدثت على مدى فترات منتظمة خلال 30 مليون سنة. يناقش هذا القسم أيضاً تشكيل الحياة، إضافة إلى دمارها – بمراجعة ما هو معروف عن الانقراضات الجماعية الرئيسة الخمسة، بما فيها الحدث الكارثي الذي قتل الديناصورات.

يجمع القسم الثالث والأخير الأفكار الواردة في القسمين الأولين معا، ويبدأ بنقاش حول نماذج المادة المعتمة. ويشرح النماذج المألوفة أكثر عن ماهية المادة المعتمة، إضافة إلى الافتراض الأحدث عن تفاعلات المادة المعتمة المشار إليها أعلاه.

في هذه اللحظة، نحن نعلم أن المادة المعتمة والمادة العادية تتفاعلان عن طريق الجاذبية. ونتائج الجاذبية بوجهٍ عام ضئيلة جداً إلى درجة أننا نرصد فقط تأثير الكتل الضخمة – مثل الأرض والشمس – وحتى هذه ضعيفة جداً. في النهاية، يمكنك أن تلتقط دبوس ورق باستخدام مغناطيس صغير، وأن تنجح في منافسة تأثير جاذبية الكرة الأرضية بكاملها.

لكن قد تتعرض المادة المعتمة لقوى أخرى أيضاً. ولكن نموذجنا الجديد يتحدى افتراض الناس – وتحيزهم – بأن المادة العادية فريدة بسبب القوى – الكهرومغناطيسية، والقوى النووية الضعيفة والقوية – التي تتفاعل من خلالها. إن قوى المادة العادية هذه، التي تعد أقوى من الجاذبية، هي سبب كثير من السمات المدهشة في عالمنا. ولكن ماذا لو أن بعض المادة المعتمة تتعرض أيضاً لتفاعلات مؤثرة غير قوى الجاذبية؟ إذا صح الأمر، يمكن أن تقود قوى المادة المعتمة إلى أدلة مثيرة عن الترابطات بين المادة الأولية والظواهر القابلة للرؤية بالعين المجردة، أدلةٍ أعمق من الأمور التي نعلم أنها موجودة.

على الرغم من أن كل شيء في الكون قابل للتفاعل من حيث المبدأ، معظم هذه التفاعلات صغيرة جداً أو سبق أن سُجِّلت. يمكن فقط ملاحظة الأشياء المؤثرة فينا بطريقة قابلة للكشف. إذا كان لديك شيء يبذل ويختبر تأثيرات ضئيلة فقط، ربما يكون أمام عينيك تماماً ومع ذلك لا تلاحظه. من المفترض أنه لهذا السبب أفلتت جسيمات المادة المعتمة – على الرغم من احتمال وجودها حولنا – من اكتشافنا إياها حتى الآن.

يبين القسم الثالث من الكتاب كيف أن التفكير بنحوٍ أوسع بالمادة المعتمة – طرح السؤال: لمَ كَونُ المادة المعتمة بسيط جداً بينما كوننا معقدٌ جداً – جعلنا نفكرُ في إمكانيات مبتكرة. ربما يختبر جزء من المادة المعتمة قواه الخاصة – الضوء المعتم إن شئت. إذا كان معظم المادة المعتمة يصنف عادة من ضمن الـ 85% غير المؤثرة نسبياً، يمكننا عندها أن نفكر في نوع مقترح جديد من المادة المعتمة كطبقة متوسطة متحركة بنحوٍ متصاعد – بتفاعلات تحاكي تفاعلات المادة العادية. ستؤثر التفاعلات الإضافية في تشكيل المجرة مما يسمح لهذا الجزء من المادة المعتمة بالتأثير في حركة النجوم والعناصر الأخرى ضمن مجال المادة العادية.

في السنوات الخمس المقبلة، ستقيس ملاحظات الأقمار الاصطناعية شكل المجرة، وتكوينها، وخواصها بتفصيل أدق من قبل- لتخبرنا بقدر كبير عن بيئتنا المجرية واختبار ما إذا كان تنبُّؤنا صحيحاً أو لا.

يمكن لمثل هذا المعنى الضمني الجدير بأن يُؤخَذ بعين الاعتبار أن يجعل المادة المعتمة ونموذجنا علماً يستحق الدراسة – حتى وإن لم تكن المادة المعتمة حجر بناء بالنسبة إليك أو إليَّ. قد تتضمن النتائج اصطدامات نيزكية – ربما يكون أحدُها هو الرابط بين المادة المعتمة واختفاء الديناصورات التي يلمح إليها عنوان الكتاب.

تُقدم إلينا الخلفية والمفهوم الذي يربط هذه الظواهر صورة واسعة ثلاثية الأبعاد عن الكون. إن هدفي من كتابة هذه الكتاب هو عرض هذا الأفكار وتشجيعك على اكتشاف وتقدير وتعزيز ثراء عالمنا المثير.

القسم الأول

تطور الكون

1

مجتمع المادة المعتمة الخفي

عادة ما نفشل في ملاحظة الأشياء التي لا نتوقعها، كالنيازك التي تومض في السماء في ليلة مظلمة، أو ظلال حيوانات غريبة تلفنا أثناء مشينا في الغابات، أو التفاصيل المعمارية الساحرة التي تحيط بنا عندما نتمشى في أرجاء مدينة ما. ومع ذلك نغفل عن مثل هذه المشاهد المدهشة – حتى وإن كانت ضمن مجال رؤيتنا مباشرة. أجسامنا تستضيف مستعمرات بكتيرية. فتعيش خلايا بكتيرية أكثر بعشرة أضعاف من الخلايا البشرية داخلنا وتساعد على استمرار بقائنا. ومع ذلك بالكاد ندرك هذه الكائنات المجهرية التي تعيش داخلنا، وتستهلك غذاءنا وتساعد جهازنا الهضمي. فقط عندما تسيء البكتيريا التصرف وتصيبنا بالمرض يعترف معظمنا بوجودها.

لرؤية الأشياء عليك أن تبحث، وعليك أن تعرف كيف تبحث. ولكن على الأقل، الظواهر التي ذكرتها حالاً يمكن رؤيتها من حيث المبدأ. ولكن تخيل التحديات الأصعب في فهم شيء لا يمكنك رؤيته حرفياً. ذلك هو المادة المعتمة Dark matter، المادة المراوغة في الكون التي لها تفاعلات صغيرة جداً مع المادة التي نفهمها. في الفصل التالي سأشرح القياسات العديدة التي توصل علماء الفلك والفيزياء من خلالها إلى وجود المادة المعتمة. ولكن في هذا الفصل، سأشرح هذه المادة المراوغة: ما هي، لِمَ يبدو أنها مراوغة، ولِمَ- نسبةً إلى بعض وجهات النظر المهمة – هي ليست كذلك.

الخفي بيننا

على الرغم من أن الإنترنت هي شبكة واحدة ضخمة يدخلها بلايين الناس، معظم الذين يتواصلون عبر شبكات التواصل الاجتماعي لا يتفاعلون بنحوٍ مباشر – أو حتى غير مباشر- بعضهم مع بعض. يميل المشاركون إلى مصادقة أشخاص يشبهونهم في أفكارهم، وإلى متابعة أشخاص باهتمامات مماثلة، ويتابعون مصادر الأخبار التي تمثل وجهة نظرهم الخاصة. بمثل هذه التفاعلات المقيدة يتجزأ مستخدمو الإنترنت إلى كتل مميزة غير متفاعلة نادراً ما يواجهون فيها وجهة نظر معارضة. حتى أصدقاء أصدقاء الأفراد لا يتعرضون بوجهٍ عام لوجهات النظر المعارضة للمجموعات المستقلة، لذلك فإن معظم مستخدمي الإنترنت غافلون عن وجود مجتمعات غير مألوفة بأفكار مختلفة ومتباينة.

لسنا جميعاً منغلقين عن عوالم خارج عالمنا. ولكن عندما يتعلق الأمر بالمادة المعتمة، جميعنا مذنبون بالتهمة الموجهة إلينا. المادة المعتمة ليست جزءاً من الشبكة الاجتماعية للمادة العادية. إنها تعيش في غرفة دردشة لا نعرف حتى الآن كيف ندخلها. إنها في الكون نفسه، وهي حتى تحتل مساحة المناطق التي تحتلها المادة العادية. ولكن جسيمات المادة المعتمة تتفاعل بنحوٍ غير ملحوظ فقط مع المادة العادية التي نعرفها. كما هي حال مجتمعات الإنترنت التي نغفل عنها – ما لم يخبرنا أحد عن المادة المعتمة، فلن ندرك وجودها في حياتنا اليومية.

كالبكتيريا الموجودة داخلنا، المادة المعتمة هي أحد "الأكوان" Universes الموجودة تحت أنفنا. ومثل الكائنات المجهرية، إنها حولنا أيضاً. تمر المادة المعتمة عبر أجسامنا – وتسكن في العالم الخارجي أيضاً. مع ذلك لا نلاحظ أياً من نتائجها لأنها تتفاعل بقدرٍ واهن جداً – إلى درجة أنها تشكل كتلة مميزة. إنها مجتمع منفصل تماماً عن المادة التي نعرفها.

ولكنها مجتمع مهم. بينما ترجع نسبة واحد أو اثنين في المئة من وزننا إلى الخلايا البكتيرية – على الرغم من عددها الهائل، يرجع 85% من المادة في الكون إلى المادة المعتمة – على الرغم من جزئها الضئيل في أجسامنا. فكل سنتيمتر مكعب حولك يحتوي على مقدار كتلة بروتون من المادة. قد يبدو هذا كثيراً أو قليلاً تبعاً لوجهة نظرك. ولكن ذلك يعني أنه إذا كانت المادة المعتمة تتألف من جسيمات يمكن مقارنة كتلتها مع الجسيمات التي نعرفها، وإذا كانت هذه الجسيمات تنتقل بالسرعة التي نتوقعها بالاعتماد على ديناميكيات مفهومة، فإن بلايين جسيمات المادة المعتمة تمر من خلالنا في كل ثانية. ومع ذلك لا أحد يلاحظ وجودها، لأن تأثير بلايين جسيمات المادة المعتمة فينا ضئيل جداً.

ذلك لأننا لا نستطيع الإحساس بالمادة المعتمة. فالمادة المعتمة لا تتفاعل مع الضوء – على الأقل إلى الدرجة التي تمكن عندها الناس من قياسها حتى الآن. والمادة المعتمة ليست مصنوعة من نفس بنية المادة العادية – فهي لا تتألف من ذرات أو من الجسيمات الأولية التي تتفاعل مع الضوءالذي هو أساسي لكل شيء نستطيع أن نراه. إن اللغز الذي نأمل أنا وزملائي أن نحله هو معرفة ممَّ تتشكل المادة المعتمة تحديداً. هل تتألف من نوع جديد من الجسيمات؟ إن كان الأمر كذلك، فما خواصها؟ فضلاً عن تفاعلاتها الجاذبية، هل لها أي تفاعلات على الإطلاق؟ إن حالفنا الحظ بالتجارب الحالية، فقد تختبر جسيمات المادة المعتمة بعض التفاعلات الكهرومغناطيسية Electromagnetic interactions الضئيلة التي كانت حتى الآن أصغر من أن ترصد. ما زالت المسابير Probes المكرَّسة لهذا الغرض قيد البحث – وسأشرح كيف في القسم الثالث من الكتاب. ولكن حتى الآن تبقى المادة المعتمة غير مرئية. وتأثيرها لم يصل إلى الكواشف Detectors بحسب مستواها الحالي من الحساسية.

لكن، عندما تتراكم كميات كبيرة من المادة المعتمة إلى مناطق مركزة، يصبح تأثير جاذبيتها الصافي Net gravitational influence بليغاً، مما يؤدي إلى تأثير قابل للقياس على النجوم وفي المجرات المجاورة. تؤثر المادة المعتمة في توسع Expansion الكون، وفي مسارات أشعة الضوء التي تصل إلينا من العناصر البعيدة، وفي مدارات النجوم حول مراكز المجرات، وفي العديد من الظواهر الأخرى القابلة للقياس بطرق تقنعنا بوجودها. نحن نعلم عن المادة المعتمة – وعن وجودها بالفعل – بسبب هذه التأثيرات الجاذبية القابلة للقياس هذه.

إضافةً إلى ذلك، على الرغم من عدم القدرة على رؤيتها أو الإحساس بها، أدت المادة المعتمة دوراً محورياً في تشكيل بنية الكون. يمكن مقارنة المادة المعتمة بطبقة المجتمع الأقل أهمية. مع أن النخبة من صناع القرار لا يرونهم، إلا أن العمال الذين بنوا الأهرام والطرق السريعة أو صنعوا الإلكترونيات هم الوحدة الأساسية في تطوير حضاراتهم. مثلها كمثل الكتل الأخرى غير الملحوظة بيننا، المادة المعتمة جوهرية في عالمنا.

لن نكون موجودين حتى لنعلِّق على هذا، فضلاً عن رسم صورة متناسقة عن تطور الكون، لو لم تكن المادة المعتمة موجودة في بداية الكون. من دون المادة المعتمة، لن يكون هناك الوقت الكافي لتشكيل البنية التي نلاحظها الآن. فقد مهدت كتل من المادة المعتمة مجرة درب التبانة – إضافة إلى مجرات وعناقيد مجرية أخرى. لو لم تتشكل المجرات، لما تشكلت النجوم أو المجموعة الشمسية أو الحياة كما نعرفها. حتى يومنا هذا، يحافظ النشاط المشترك للمادة المعتمة على سلامة المجرات والعناقيد المجرية. كما قد تكون المادة المعتمة مرتبطة بمسار المجموعة الشمسية إذا كان القرص المعتم المشار إليه في المقدمة موجوداً.

مع ذلك لا نلاحظ المادة المعتمة بنحوٍ مباشر. درس العلماء أشكالاً كثيرة للمادة ولكن جميع هذه الأشكال التي نعلم تركيبها رُصِدت باستخدام شكلٍ من أشكال الضوء – أو بشكل أكثر عموماً، بإشعاعات كهرومغناطيسية. تبدو الإشعاعات الكهرومغناطيسية كالضوء عند الترددات المرئية، ولكن يمكن أن تظهر أيضاً كموجات إشعاعية أو أشعة فوق بنفسجية، على سبيل المثال، عندما تكون خارج النطاق المحدود للترددات التي يمكن رؤيتها. يمكن ملاحظة التأثيرات تحت المجهر، أو بجهاز رادار، أو بصور بصرية على صورة فوتوغرافية. ولكن التأثيرات الكهرومغناطيسية دائماً موجودة. ليست كل التفاعلات مباشرة – العناصر المشحونة تتفاعل مع الضوء بنحو مباشر غالباً. ولكن عناصر النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات – العناصر الأساسية للمادة كما

نعرفها – تتفاعل بعضها مع بعض بما يكفي بحيث إن الضوء إن لم يكن صديقاً، فهو على الأقل صديق صديق لجميع أشكال المادة التي نستطيع رؤيتها.

ليس بصرنا فقط، بل أيضاً حواسنا الأخرى – اللمس، الشم، التذوق، والسمع – تعتمد على التفاعلات الذرية، التي تعتمد بدورها على الجسيمات المشحونة كهربائياً. تعتمد حاسة اللمس أيضاً، ولو لأسباب أكثر غموضاً، على التفاعلات والاهتزازات الكهرومغناطيسية. لأن الحواس البشرية ترتكز على التفاعلات الكهرومغناطيسية من أي نوع، لا يمكننا اكتشاف المادة المعتمة بالطرق المعتادة. على الرغم من وجود المادة المعتمة حولنا، لا يمكننا رؤيتها أو الشعور بها. عندما يشع الضوء على المادة المعتمة، لا تؤدي أيَّ تفاعل، بل يمر الضوء عبرها فقط.

بالتسليم بأن الناس لم يروا (أو يشعروا أو يشموا) المادة المعتمة، دهِش كثيرون ممن تحدثت إليهم من وجودها ورأوا أنها غامضة جداً – أو حتى تساءلوا إذا ما كان هناك خطأ ما. يسأل الناس كيف من الممكن أن تكون معظم المادة – نحو خمسة أضعاف كمية المادة العادية – غير قابلة للاكتشاف بالتلسكوبات التقليدية. أنا شخصياً، أتوقع العكس تماماً (مع أنني أعترف فإن الجميع لا يرون الأمر بهذه الطريقة). سيكون الأمر أكثر غموضاً بالنسبة إلي لو كانت المادة التي نراها بأعيننا هي كل المادة الموجودة. لمَ يجب أن نمتلك حواس مثالية تتلقى كل شيء بنحو مباشر؟ إن الدرس المهم من الفيزياء خلال القرون الماضية هو الأشياء الكثيرة المختبئة عن نظرنا. من وجهة النظر هذه، السؤال الحقيقي هو لمَ يجب أن تحتوي الأشياء التي نعرفها على كثافة طاقة الكون كما هي.

قد تبدو المادة المعتمة اقتراحاً غريباً للبعض، ولكن اقتراح وجودها أقل تهوراً بكثير من قلب قوانين الجاذبية – كما قد يفضل المشككون في المادة المعتمة. من المرجح أن تمتلك المادة المعتمة – رغم أنها غير مألوفة – تفسيراً تقليدياً نوعاً ما قد يتوافق بشكل تام مع كل القوانين الفيزيائية المعروفة. في المحصلة، لمَ يجب على جميع المواد التي تتفاعل بحسب قوانين الجاذبية المعروفة أن تتصرف تماماً كالمادة المألوفة؟ أو لنقلها باختصار، لمَ يجب على جميع المواد أن تتفاعل مع الضوء؟ يمكن أن تكون المادة المعتمة ببساطة هي مادة ليست لديها شحنات مختلفة أو أساسية. من دون الشحنات الكهربائية أو التفاعلات مع الجسيمات المشحونة، لا يمكن للمادة المعتمة أن تمتص الضوء أو ترسله.

لكن، لدي مشكلة صغيرة تتعلق بإحدى سمات المادة المعتمة، وهي اسمها. لا مشكلة لدي في اسم "المادة". فالمادة المعتمة هي فعلاً شكل من أشكال المادة – بمعنى أنها شيء يتكتل وينشئ تأثيراته الجذبية الخاصة – تتفاعل مع الجاذبية مثل بقية المواد. ويلاحظ علماء الفلك والفيزياء وجودها بطرق مختلفة تعتمد على هذا التفاعل.

لكن كلمة "المعتمة" هي غير الموفقة – لأننا نرى الأشياء المعتمة التي تمتص الضوء، ولأن الوصف غير الموفق يجعلها تبدو أكثر فعالية وسلبية مما هي عليه في الواقع. المادة المعتمة ليست معتمة – إنها شفافة Transparent. الأشياء المعتمة تمتص الضوء. ولكن الأشياء الشفافة في المقابل غافلة عن الضوء. يمكن للضوء أن يضرب المادة المعتمة، ولكن لا الضوء ولا المادة سيتغيران بالنتيجة.

في مؤتمر جمع كثيراً من الناس من مختلف فروع العلوم، التقيت ماسيمو Massimo، خبير تسويق يختص بالعلامة التجارية. عندما أخبرته عن بحثي، نظر إلي في ريبة وسألني: "لم تُسمى بالمادة المعتمة؟". لم يكن اعتراضه على العلم، بل على دلالات الاسم السلبية غير الضرورية. ليس صحيحاً بالضرورة أن كل العلامات التجارية تربط المزايا السلبية مع "المعتم". "الفارس الأسود" The Dark Knight كان من الأخيار – وإن كان الوضع معقدا. ولكن مقارنة باستخدامها في الظلال السوداء Dark Shadows، مواده المعتمة His Dark Materials، المتحولون: ظلام القمر Transformers: Dark of the Moon، "الجانب المظلم للقوة لدارث فايدر Darth Vader – فضلاً عن الأغنية القاتمة المضحكة من فيلم ليغو، "المعتم" في "المادة المعتمة" وديعة جداً. على الرغم من إعجابنا الواضح بالأشياء المعتمة، لا يفي وصف "المادة المعتمة" بتوقعات صيت الاسم.

مع ذلك، تشترك المادة المعتمة مع الأشياء الشريرة بميزة واحدة: إنها خفية عن الرؤية. تمت تسمية المادة المعتمة بذكاء بحيث أنه مهما قمت بتسخينها، لن ينبعث منها ضوء. وبهذا المعنى هي فعلاً معتمة – ليس بمعنى أنها كمداء وإنما بكونها على النقيض من انبعاث الضوء منها أو انعكاسه عنها. لا أحد يرى المادة المعتمة مباشرة – حتى باستخدام المجهر أو التلسكوب. ومثل الأرواح الشريرة في الأفلام وكتب الأدب، تخفِّيها هو درعها الواقي.

وافق ماسيمو على أن مصطلح "المادة الشفافة" سيكون أفضل – أو على الأقل أقل إخافة. مع أنني من وجهة نظر فيزيائية لست متأكدة من أنه محق. وعلى الرغم من أن "المادة المعتمة" ليس المصطلح المفضل لدي، يبدو أنه يجذب قدراً لا بأس به من الاهتمام. مع ذلك، المادة المعتمة ليست فعالة أو قوية – على الأقل ليس بكميات كبيرة منها. بل تتفاعل تفاعلا ضعيفا مع المادة العادية بحيث يصبح من الصعب جداً العثور عليها. وهذا ما يجعلها مثيرة للاهتمام.

الثقوب السوداء والطاقة المعتمة

يثير اسم "المادة المعتمة" التباسات أخرى أيضاً – حتى ما بعد التأثيرات المشؤومة المشار إليها أعلاه. على سبيل المثال، يخفق الكثير من الأشخاص الذين أتحدث إليهم عن بحثي في تمييز المادة المعتمة عن الثقوب السوداء Black holes. لتوضيح الفرق، سأنعطف قليلا لمناقشة الثقوب السوداء، والتي هي عناصر تتشكل عندما تتراكم مادة كبيرة في مساحة صغيرة من الفضاء. لا شيء – بما في ذلك الضوء – يفلت من تأثير جاذبيتها الهائلة.

تختلف الثقوب السوداء والمادة المعتمة اختلاف الحبر الأسود والأفلام من فئة نوار Film noir. لا تتفاعل المادة المعتمة مع الضوء. في حين أن الثقوب السوداء تمتص الضوء – وأي شيء يقترب منها. الثقوب السوداء هي سوداء لأن كل الضوء الذي يقع داخلها يبقى في داخلها. فلا يفلت منها شعاع ولا ينعكس من فوقها. قد تكون المادة المعتمة ذات علاقة بتشكيل الثقوب السوداء[1] ما دام أي نوع من المادة قد ينهار ليشكل مادة. ولكن المادة المعتمة والثقوب السوداء ليستا شيئاً واحداً على الإطلاق. ولا يجوز اللبس بينهما بأي طريقة.

يثير الاسم غير الموفق للمادة المعتمة سوءَ فهم آخر. لأن هناك عنصراً آخر من عناصر الكون يسمى "الطاقة المعتمة"- اختياراً إشكالياً أيضاً- يخلط الناس بينها وبين المادة المعتمة. مع أن هذا انحراف عن موضوعنا الأساسي، الطاقة المعتمة هي جزء أساسي من الكوزمولوجيا في يومنا هذا. لذلك سأوضح هذا المصطلح أيضاً لأتأكد من أنك – يا قارئي المتنور – ستعلم الفرق دائماً.

الطاقة المعتمة ليست مادة – إنها طاقة فحسب. توجد الطاقة المعتمة حتى إن لم يكن هناك جسيمات فعلية أو أي شكل من الأشياء في الجوار. إنها تخترق الكون، ولكنها لا تتكتل كالمادة العادية. إن كثافة الطاقة المعتمة هي نفسها في أي مكان – لا يمكن أن تكون أكثر كثافة في مكان دون غيره. إنها مختلفة جداً عن المادة المعتمة، التي تتجمع إلى عناصر، وتصبح أكثر كثافة في بعض الأماكن دون غيرها. تتصرف المادة المعتمة مثل المادة المألوفة، التي تتجه نحو العناصر كالنجوم، والمجرات، والعناقيد المجرية. بينما يكون توزيع الطاقة المعتمة دائماً سلساً.

كما تبقى الطاقة المعتمة ثابتة على مر الوقت. على عكس المادة أو الإشعاع، لا تصبح الطاقة المعتمة قليلة الكثافة عندما يتوسع الكون. وهذا إلى حد ما هو ميزتها الخاصة. تبقى كثافة الطاقة المعتمة – الطاقة التي لا تنتقل بالجسيمات أو المادة – هي نفسها على مر الوقت. ولهذا السبب، يشير علماء الفيزياء عادة إلى هذا النوع من الطاقة بـ *الثابت الكوني Cosmological constant*.

في بداية تطور الكون، كان معظم الطاقة ينتقل عن طريق الإشعاع. ولكن الإشعاع يتوسع بنحوٍ أسرع من المادة لذلك أصبحت المادة في النهاية هي المساهم الأكبر في الطاقة. في وقت لاحق من تطور الكون، جاءت الطاقة المعتمة – التي لم تتوسع مطلقاً على عكس المادة والإشعاع – لتسيطر وهي الآن تُشكِّل نحو 70% من كثافة الطاقة في الكون.

قبل أن يقدم آينشتاين نظريته في النسبية، فكر الناس فقط في الطاقة النسبية Relative energy – فرق الطاقة بين بنية وأخرى. ولكن بالتسلح بنظرية آينشتاين، تعلمنا أن الكمية المطلقة من الطاقة هي بحد ذاتها مهمة وتنتج قوة جذبية يمكنها أن تقلص أو توسع الكون. اللغز الأكبر المتعلق بالطاقة المعتمة هو ليس سبب وجودها – تقترح ميكانيكا الكم Quantum mechanics ونظرية الجاذبية Theory of gravity ضرورة وجودها وتخبرنا نظرية آينشتاين بأن لها آثاراً فيزيائية – بل سبب كثافتها القليلة جداً. نظراً إلى سيطرتها، لا يبدو هذا الأمر ذا أهمية. ولكن على الرغم من أن الطاقة المعتمة تشكل معظم طاقة الكون اليوم، حتى وقت قريب فقط – بعد أن توسع الإشعاع والمادة بقدر كبير بسبب توسع الكون – حتى بدأ أثر الطاقة المعتمة بمنافسة أثر الأنواع الأخرى من الطاقة. قبلاً، كانت كثافة الطاقة المعتمة ضئيلة جداً مقارنة بالمساهمة الأكبر للإشعاع وللمادة. من دون معرفة الإجابة بنحو مسبق، قدّر علماء الفيزياء أن كثافة الطاقة المعتمة يجب أن تكون أكبر بقدر 120 قيمة أسية. لقد حيرت مسألة الحجم الصغير للثابت الكوني علماء الفيزياء سنوات.

يقول عديد من علماء الفلك إننا نعيش الآن في عصر ازدهار علم الكوزمولوجيا، حيث تقدمت فيه النظريات والمشاهدات الرصدية إلى مرحلة أصبحت الاختبارات المعايرة متناهية الدقة precisely calibrated tests تساعد على تحديد أي الأفكار تتحقق في الكون. لكن، نظراً إلى سيطرة المادة المعتمة والطاقة المعتمة، وغموض سبب بقاء كمية كبيرة من المادة العادية حتى اليوم، يمزح علماء الفيزياء بقولهم إننا نعيش في العصور المظلمة.

ولكن هذه الألغاز تحديداً تجعل هذا الوقت وقتاً مثيراً لأي أحد يود أن يدرس الكوزموس Cosmos. لقد حقق العلماء قدرا كبيرا من التقدم في فهم القطاع المعتم، ومع ذلك تبقى هناك أسئلة كبيرة علينا أن نخضعها للتطوير. بالنسبة إلى باحثة مثلي، هذه هي الحالة المثلى.

ربما يمكن القول إن علماء الفيزياء الذين يدرسون "المعتم" يساهمون بثورة كوبرنيكية أكثر تجريدية. ليس فقط أن الأرض ليست مركز الكون فيزيائياً، ولكن تركيبتنا الفيزيائية ليست محورية لميزانية الطاقة Energy budget – أو حتى لمعظم مادتها. ولأن العنصر الأول الذي درسه الناس في الكون هو الأرض – العنصر المألوف لديهم أكثر من غيره – ركز علماء الفيزياء أولاً على المادة التي تكوننا، والقابلة للوصول إليها بسهولة، والواضحة، والأساسية في حياتنا. لم يكن استكشاف المناطق الجغرافية المختلفة في الأرض سهلاً دائماً. ولكن بقدر أهمية فهم الأرض، بقدر ما كانت أسهل في الدراسة من غيرها من نظيراتها الأبعد – المناطق الأبعد في المجموعة الشمسية والفضاء الخارجي.

بالمثل كان التعرف على العناصر الأساسية للمواد العادية صعباً أيضاً، ولكن دراستها كانت واضحة أكثر من تفحص المادة المعتمة "الشفافة" التي لا يمكن رؤيتها – ولكن الموجودة حولنا. لكن، الوضع آخذ في التغير. إن دراسة المادة المعتمة اليوم واعدة جداً بحيث يمكن تفسيرها بمبادئ فيزياء الجسيمات التقليدية، وستكون سهلة الانصياع لمجموعة واسعة من المسابير التجريبية النشطة حالياً. على الرغم من ضعف تفاعلاتها، تتوافر للعلماء فرصة حقيقية في العقد المقبل لتحديد طبيعة المادة المعتمة والاستدلال عليها. ولأن المادة المعتمة تتجمع لتشكل مجرات وبنى أخرى، ستسمح المشاهدات المقبلة للمجرة وللكون لعلماء الفيزياء والفلك بقياسها بطرق أحدث. إضافة إلى ذلك، كما سنرى، قد تكون المادة المعتمة هي السبب لبعض السمات في مجموعتنا الشمسية المتعلقة بالاصطدامات النيزكية ومسار تطور الحياة على الأرض. المادة المعتمة ليست منفصلة في الفضاء (وهي حقيقية)، لذلك لا حاجة إلى المركبة الفضائية إنتربرايز Enterprise كي نصل إليها. ولكن مع

الأفكار والتقنيات المستخدمة حالياً، يمكن أن تكون المادة المعتمة هي الغايةَ النهائية – أو على الأقل الغاية المثيرة التالية.

في أثناء المشي على أرصفة مانهاتن أو قيادة السيارة في شوارع هوليوود، تشعر أحياناً بوجود شخص مشهور بالقرب منك. حتى إن لم ترَ جورج كلوني مباشرة، ولكن الازدحام المعرقل الذي يصنعه الحشد المنتظر والمسلح بالهواتف النقالة والكاميرات يكفي لينبهك لقرب شخص شهير. على الرغم من أنك تكتشف حضوره بشكل غير مباشر، من خلال أثر جورج الجوهري في كل من حولك، إلا أنك ستكون على يقين من أن شخصاً مميزاً في الجوار.

أحياناً عندما تمشي في غابة، يطير سرب من الطيور فجأة باهتياج، أو يفر ظبي من أمامك. قد لا تواجه الصياد الذي دفع هذه الحيوانات إلى الحركة بشكل مباشر. ومع ذلك، فإن حركة الحيوانات تُعرِّفك على وجود الصياد وتساعد على سرد قصتهم.

نحن لا نرى المادة المعتمة، ولكنها – كالشخصية المشهورة أو الصياد – تؤثر في محيطها. استخدم علماء الفلك هذه التأثيرات غير المباشرة للاستدلال على وجود المادة المعتمة. وقياسات اليوم تخبرنا عن مساهمة طاقة المادة المعتمة بدقة متزايدة. على الرغم من أن الجاذبية قوة ضعيفة، إلا أن كميات كبيرة بما يكفي من المادة المعتمة تُكوِّن تأثيراً قابلاً للقياس – وهناك كثير منها في الكون بالفعل. نحن لا نعلم حتى الآن ما طبيعة المادة المعتمة، ولكن القياسات التي سأصفها الآن تبين أن المادة المعتمة هي عنصر حقيقي وأساسي في عالمنا. فالمادة المعتمة، على الرغم من عدم رؤيتها بالعين المجردة أي بالمشاهدات المباشرة، لا تختبئ بنحو كامل.

تاريخ موجز للاستدلال على المادة المعتمة

كان فريتز زفيكي Fritz Zwicky مفكراً مستقلاً يتمتع ببعض الأفكار المثيرة للاهتمام إضافة إلى بعض الأفكار عديمة المعنى. كان دائماً مدركاً لغرابة أطواره، حتى أنه أزمع على كتابة سيرته الذاتية بعنوان: عمليات *الذئب الوحيد Operation Lone Wolf*. قد تفسر سمعته جزءاً من السبب، على الرغم من أنه في العام 1933 حقق واحداً من أروع الاكتشافات في القرن العشرين، لم يؤخذ على محمل الجد إلا بعد أربعين سنة أخرى.

مع ذلك كان استنتاج زفيكي في عام 1933 لافتاً للنظر بالفعل. لقد لاحظ سرعات المجرات في عنقود كوما Coma Cluster (العنقود هو مجموعة كبيرة من المجرات المترابطة بالجاذبية). تتنافس قوة سحب تجاذبي Gravitational attraction للمادة داخل العنقود مع الطاقة الحركية Kinetic energy للنجوم الموجودة فيه لكي تخلق نظاماً مستقراً. في حال كانت الكتلة منخفضة جداً، لن يمنع السحب التجاذبي للعنقود الطاقةَ الحركية للنجوم من إبعادها عنه. بالاستناد إلى قياساته لسرعة النجوم، حسب زفيكي أن كمية الكتلة المطلوبة للعنقود لكي يكون لديه شد تجاذبي كافٍ هي 400 مرة أكبر من الكتلة الضوئية Luminous mass المقِيسة – المادة التي تبعث الضوء. لتبرير المادة الإضافية، اقترح زفيكي وجود ما أسماه Dunkle Materie، أي المادة المعتمة باللغة الألمانية، وهي تبدو إما مُنذرة أكثر أو سخيفة أكثر بحسب طريقة لفظك لها.

وصل عالم الفلك اللامع الهولندي يان أوورت Jan Oort إلى استنتاج مماثل قبل زفيكي بعام. لاحظ أوورت أن سرعات النجوم ضمن محيطنا المجري أسرع من أن تنسب حركتها إلى تأثير جاذبية المادة المضيئة Luminous matter فقط. استنتج أوورت أيضاً أن هناك حلقة مفقودة. لم يخمن شكلاً جديداً للمادة، بل فقط مادة عادية غير ساطعة – وهو اقتراح رُفِض لعدة أسباب سأناقشها أدناه.

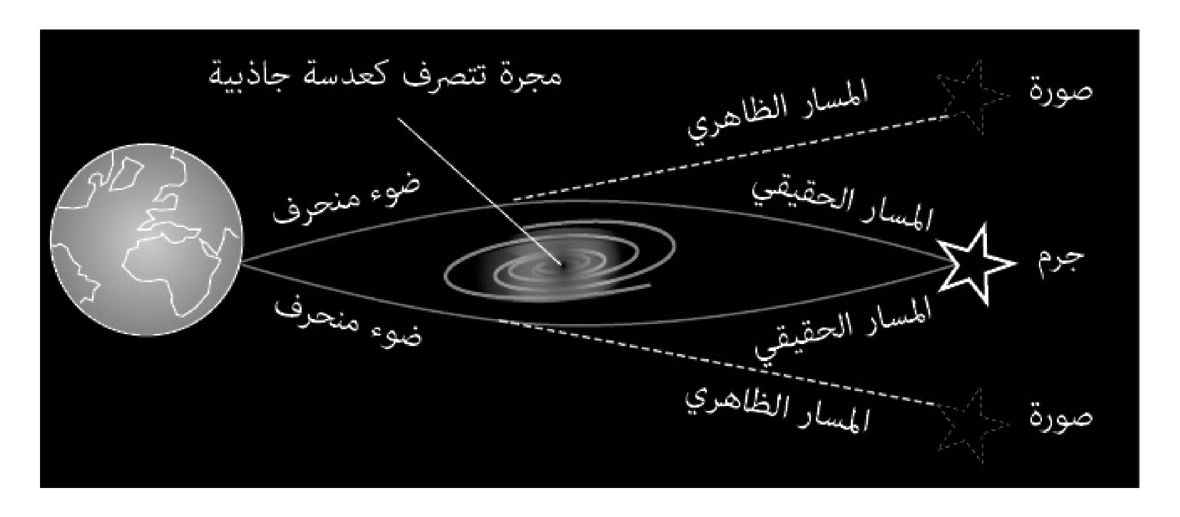
ولكن ربما لم يكن أوورت الأول في العثور على هذا الاكتشاف أيضاً. في مؤتمر حضرته أخيراً في الكوزمولوجيا في ستوكهولم، أخبرتني زميلتي السويدية لارز بيرغستروم Lars Bergstrom عن المشاهدات غير المعروفة نسبياً لعالم الفلك السويدي كنت لندمارك Knut Lundmark، الذي لاحظ مادة مفقودة في المجرات قبل عامين من استنتاج أوورت. على الرغم من أن لندمارك، مثل أوورت، لم يقدم الاقتراح الجريء حول شكل جديد كلياً من أشكال المادة، كانت قياساته لمعدل المادة المعتمة بالنسبة إلى المادة غير المرئية تقارب بشكل تقريبي المعدلَ الصحيح، النسبة التي نعلم الآن أنها نحو خمسة أضعاف.

مع ذلك على الرغم من هذه الملاحظات المبكرة، أُغفلت المادة المعتمة وقتاً طويلاً.انتعشت الفكرة من جديد في سبعينات القرن العشرين عندما لاحظ علماء الفلك حركة المجرات التابعة Satellite galaxies – مجرات صغيرة في جوار مجرات أكبر – التي يمكن تفسيرها فقط بوجود مادة إضافية غير مرئية. بدأت هذه الملاحظات وغيرها بتحويل المادة المعتمة إلى موضوع مهم للبحث.

ولكن الفكرة رُسِّخت فعليا بعمل فيرا روبن Vera Rubin، عالمة فلك في معهد كارنيغي Carnegie Institution للعلوم في واشنطن، والتي عملت مع عالم الفلك كنت فورد Kent Ford. بعد استكمالها دراساتها العليا في جامعة جورجتاون Georgetown University، قررت روبن قياس الحركة الزاويّة Angular motion للنجوم في المجرات – بدءاً من آندروميدا (مجرة المرأة المسلسلة) Andromeda – تجنباً للتعدي على مناطق أبحاث العلماء الآخرين المحمية بضراوة. ثم غيرت اتجاه بحثها بعد أن رفض- مبدئياً-معظم المجتمع العلمي أطروحتها التي قاست سرعات المجرة Galaxy velocities وأكدت وجود العناقيد المجرية Galaxy clusters، وكان الرفض إلى حد ما نتيجة السبب غير المبرر بأن البحث تقاطع مع المجالات العلمية للآخرين. قررت روبن اختيار أبحاثها من مجال بحث أقل اكتظاظاً، لذلك قررت دراسة السرعات المدارية Orbital speeds للنجوم.

قرار روبن ربما قادها إلى ما هو أهم اكتشاف في زمنها. في سبعينات القرن العشرين، اكتشفت روبن وزميلها كنت فورد أن السرعات الدورانية للنجوم هي نفسها تقريباً عند أي مسافة من المركز المجري. بمعنى أن النجوم كانت تدور بسرعة ثابتة، حتى في الأماكن البعيدة عن تلك المتأثرة بالمادة المضيئة. التفسير الممكن الوحيد هو وجود مادة مجهولة غير معروفة بعد تُلجِم حركة النجوم الأبعد، التي كانت تتحرك بسرعة أكبر من المتوقع. من دون هذه المساعدة الإضافية، ستندفع النجوم بالسرعة التي قاستها روبن وفورد إلى خارج المجرة. كان استنتاج هذين الباحثين المثير هو أن المادة العادية توفر سُدس الكتلة المطلوبة فقط للحفاظ عليها ضمن مدارها. أثمرت ملاحظات روبن وفورد أقوى دليل في ذلك الوقت على المادة المعتمة، وبقيت منحنيات الدوران المجرية Galaxy rotation curves دليلاً مهماً.

منذ سبعينات القرن العشرين، أصبح الدليل على المادة المعتمة، وعلى كمية كثافة الطاقة الصافية للكون التي تحمله المادة المعتمة أقوى وأكثر تحديداً. من بين التأثيرات الديناميكية التي تتيح لنا أن نعرف عن المادة المعتمة دوران النجوم في المجرات التي شرحتها للتو. لكن، تنطبق هذه القياسات على المجرات الحلزونية Spiral galaxies فقط – مجرات مثل مجرتنا درب التبانة، التي تمتلك مادة مرئية على شكل قرص مع أذرع لولبية تمتد نحو الخارج. هناك فئة مهمة أخرى هي المجرات الإهليليجية Elliptical galaxy، التي تكون فيها المادة المضيئة ذات شكل منتفخ. في المجرات الإهليليجية كما الحال في قياسات زفيكي للعناقيد المجرية، يمكن قياس *تشتت السرعة Velocity dispersions* – مدى اختلاف السرعات بين النجوم في المجرات. لأن هذه السرعات تحددها الكتلة داخل المجرة، فإنها تؤدي دور الوكلاء Proxies في قياس كتلة تلك المجرة. تبين قياسات المجرات الإهليليجية أن المادة المضيئة غير كافية لتبرير الحركات المقِيسة للنجوم فيها. علاوة على ذلك، تستدعي أيضاً القياسات الديناميكية للغاز البينجمي Interstellar gas – الغاز غير المحتوى في النجوم – وجود المادة المعتمة. بما أن هذه القياسات بنيت على أبعاد تزيد على عشرات أضعاف مسافات المادة المرئية في مراكز المجرات، فقد بينت أن المادة المعتمة ليست موجودة فحسب، بل يمتد مداها إلى أبعد من الجزء المرئي من المجرة. وقد أكدت مقاييس الأشعة السينية لحرارة وكثافة الغاز هذه النتيجة.



[الشكل الأول] عنصر ساطع مثل النجم أو المجرة يرسل ضوء ينحني حول عنصر ضخم مثل العنقود المجري. يرسم المراقب من الأرض الضوء كصور متعددة عن المصدر الأساسي المرسل للضوء.

تأثير عدسة الجاذبية

يمكن قياس كتلة العناقيد المجرية أيضاً باستخدام تأثير عدسة الجاذبية (العدسي التثاقلي). (انظر الشكل 1). من جديد، تذكر أنه لا أحد يرى المادة المعتمة بحد ذاتها. ولكن مع ذلك يمكن للمادة المعتمة أن تؤثر في المادة المحيطة بها، حتى الضوء، من خلال تأثير الجاذبية. على سبيل المثال، وفقا لملاحظات زفيكي في أثناء رصد العنقود كوما، أثرت المادة المعتمة في حركة المجرات بطريقة تمكن هو من مشاهدتها. فيمكن قياس المادة المعتمة، على الرغم من كونها غير مرئية بحد ذاتها، من خلال تأثيرها في العناصر المرئية.

الفكرة وراء اقتراح تأثير عدسة الجاذبية، الذي اقترحه أولَ مرة العالم متعدد المواهب فريتز زفيكي Fritz Zwicky، هو أن التأثير الـتجاذبي للمادة المعتمة سيغير أيضاً من مسار الضوء المـرسل من الأجرام الساطعة إلى مكان آخر. لذلك فإن التأثير التـجاذبي لجرم ضخم مثل عنقود مجري يعترض مسارها سيحني مسار أشعة الضوء التي يرسلها الجرم المضيء. عندما يكون العنقود ضخماً بما يكفي، يمكن ملاحظة انحراف مـسارات الضوء.

يعتمد اتجاه إعادة التوجيه Reorientation على الاتجاه الأساسي للضوء: فالضوء الذي يمر من فوق العنقود ينحني إلى الأسفل بينما ينحني الضوء على اليمين نحو اليسار. عند تتبع الأشعة كما وصلت بخطوط مستقيمة، ستنتج المشاهدات صوراً متعددة للجرم الذي ولد الضوء بالدرجة الأولى. أدرك زفيكي أنه يمكن الاستدلال على المادة المعتمة في العناقيد المجرية من خلال التغير الملحوظ في أشعة الضوء وفي الصور الظاهرية المتعددة، والتي ستعتمد على الكتلة الكاملة التي يحتويها العنقود المعترض لمسار الضوء. ينتج تأثير *عدسة الجاذبية القوية Strong gravitational lensing* صوراً متعددة للجرم المُرسِل للضوء. بينما يمكن استخدام التأثير *عدسة الجاذبية الضعيفة Weak gravitational lensing*، والذي تتشوه فيه الأشكال من دون أن تتعدد صورها، عند حافة العنقود حيث يكون التأثير ضعيفا.

ومثل سرعات المجرات في العنقود التي أدت إلى الاستنتاج الثوري لزفيكي، يحمل الضوء المنحني نتائج مرئية عن الكتلة الكاملة للعنقود، على الرغم من عدم مرئية المادة المعتمة بحد ذاتها. ولم ترصد هذه المشاهدات المثيرة إلا بعد عدة سنوات من اقتراحها أولَ مرة.

لكن قياسات تأثير عدسة الجاذبية أصبحت اليوم من أهم الملاحظات في دراسة المادة المعتمة. إن تأثير عدسة الجاذبية موضوع ممتع لأنه (نوعاً ما) طريقة لرؤية المادة المعتمة بشكل غير مباشر. تحني المادة المعتمة الضوء بين الجرم المضيء والمشاهد.

وهذا يحدث بنحو مستقل عن أي افتراضات ديناميكية مثل تلك المستخدمة في قياسات سرعة المجرات والنجوم. تقيس عدسة الجاذبية بنحو مباشر الكتلة بين مرسل الضوء وبيننا. ويقع أحياناً وراء عنقود مجري (أو جرم يحتوي على مادة معتمة) يرسل الضوء على خط مرمى نظرنا ويحني العنقود المجري ذلك الضوء. استخدم تأثير عدسة الجاذبية أيضاً لقياس المادة المعتمة في المجرات، حيث يظهر ضوء نجم كوازار (نجم زائف) Quasar مرسلاً من خلف مجرة يظهر بصور متعددة نتيجة التشوه بفعل التأثير التجاذبي للمادة المجرية – بما في ذلك المادة المعتمة غير المضيئة.

عنقود الطلقة

تؤدي قياسات تأثير عدسة الجاذبية أيضاً دوراً فيما يمكن أن يكون أقوى الأدلة القاطعة على وجود المادة المعتمة، التي تأتي من عناقيد مجرات قد اندمجت – كما حـدث مع *عنقود الطلقة* ***Bullet Cluster*** الشهير (عـلى الأقل بين علماء الفيزياء). (انظر: الشكل 2). تشكل عنقود الطلقة فعلياً من اندماج عنقودين مجريين على الأقل. احتوت العناقيد الأسلاف على المادة المعتمة والمادة العادية – تحديداً على غاز مطلق للأشعة السينية. يختبر الغاز تفاعلاً كهرومغناطيسياً وهذا يكفي ليمنع غاز العنقودين من الانتقال وتجاوز العنقودين، نتيجة ذلك أن الغاز الذي كان يتنقل في البداية مع العناقيد يصبح محصورا في الوسط. في المقابل، تتفاعل المادة المعتمة بقدرٍ ضئيل – مع الغاز، ومع نفسها، كما يبين عنقود الطلقة. لذلك يمكنها أن تنساب من دون عرقلة، ما ينجم عنها شكل أذني ميكي ماوس منتفختين من الجهة الخارجة من العنقود المندمج. يؤدي الغاز دور الازدحام المروري لسيارات متجمعة بعد أن يندمج مساران من اتجاهين مختلفين، بينما المادة المعتمة هي مثل دراجة رشيقة تتحرك بحرية يمكنها أن تمر عبر الازدحام.



[الشكل 2] يندمج عنقودان ليشكلا العنقود الطلقة، يعلق فيه الغاز في وسط المنطقة المندمجة وتمر المادة المعتمة لتشكل مناطق خارجية منتفخة تحتوي على المادة المعتمة.

استخدم علماء الفلك قياسات التأثير بعدسة الجاذبية لتحديد أنه يمكن العثور على المادة المعتمة في المناطق الخارجية، بينما استخدموا قياسات الأشعة السينية للوصول إلى أن الغاز بقي عالقاً في الوسط. لعل هذا أقوى دليل متوافر على المادة المعتمة. على الرغم من أن البعض لا يزال يقدم فرضيات لتعديلات في الجاذبية، إلا أنه من الصعب تفسير البنية المميزة لعنقود الطلقة (والمشاهدات الرصدية المشابهة الأخرى) من دون وجود مادة غير متفاعلة تبرر الأشكال المرحة. يبين العنقود الطلقة والعناقيد المشابهة وجود المادة المعتمة بأكثر الأساليب مباشرة ووضوحاً. إنها المادة التي مرت من دون أي عرقلة عندما اندمجت العناقيد.

المادة المعتمة والخلفية الميكروية الكونية

برهنت الملاحظات المذكورة آنفاً على وجود المادة المعتمة. ولكنها تتركنا مع السؤال عن مجمل كثافة الطاقة في المادة المعتمة في الكون. حتى إن كنا نعلم كمية المادة المعتمة المحتواة في المجرات والعناقيد المجرية، لا نعلم مجمل الكمية الكاملة بالضرورة. صحيح أن معظم المادة المعتمة يجب أن ينحبس في العناقيد المجرية ما دامت الخاصية المميزة لأي نوع من المادة هي تكتلها. لذا يمكن العثور على المادة المعتمة في البنى المقيدة بالجاذبية، لأنها لا تنتشر في أرجاء الكون بقدر مستفيض، من ثم يجب أن تقارب كمية المادة المعتمة المحتواة في العناقيد الكمية الكاملة تقريباً. مع ذلك، سيكون من اللطيف قياس كثافة الطاقة التي تحملها المادة المعتمة من دون افتراض مثل هذا الافتراض.

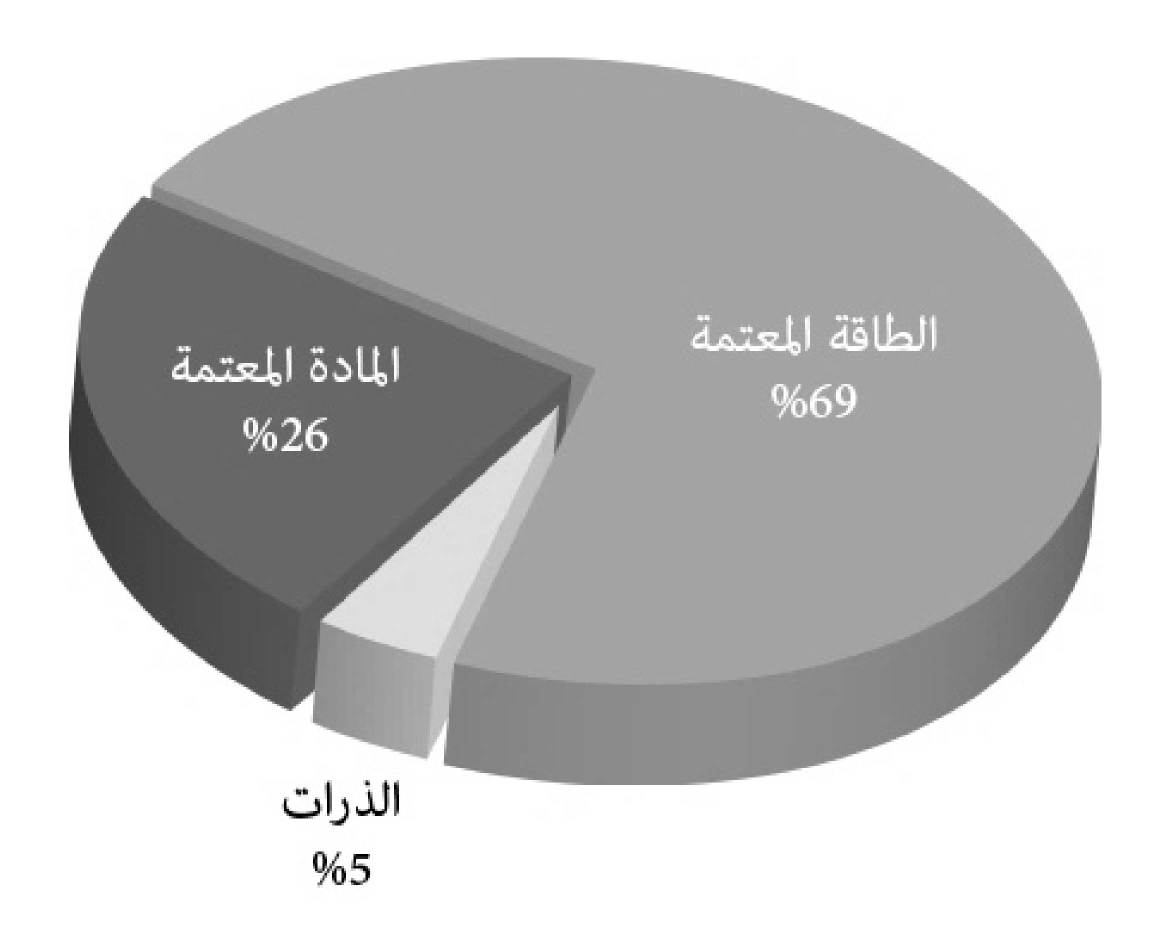
الحقيقة أنه، توجد طريقة أقوى لقياس مجمل كمية المادة المعتمة. لقد أثرت كمية المادة المعتمة في الخلفية الميكروية الكونية Cosmic microwave background – الإشعاع المتبقي من لحظات الكون الأولى. إن خواص هذا الإشعاع، الذي قِيسَ بدقة متناهية، أصبح يؤدي اليوم دوراً مهما في برهنة النظرية الكوزمولوجية Cosmological theory الصحيحة. لذلك فإن أفضل قياس لكمية المادة المعتمة يأتي من دراسة هذا الإشعاع، الذي يُعَد أنقى مسبار موجود لمراحل الكون الأولى على الإطلاق.

سأحذرك من الآن أن الحسابات دقيقة – حتى بالنسبة إلى الفيزيائيين. لكن، بعض المفاهيم الأساسية التي تدخل في التحليل هي أكثر وضوحاً بكثير. وهناك معلومة مهمة وأساسية وهي أنه في البداية، لم تكن الذرات – التي هي راوبط محايدة كهربائياً تتألف من نواة موجبة الشحنة وإلكترون سالب الشحنة – موجودة. لم تتمكن الإلكترونات والنوى من الاندماج اندماجا مستقرا لتتحول إلى ذرات إلّا بعد أن هبطت درجة الحرارة إلى أقل من طاقة الترابط الذري Atomic binding energy. فوق هذه الحرارة، كان الإشعاع يفصل البروتونات عن الإلكترونات ومن ثم يشتت الذرات. بسبب كل هذه الجسيمات المشحونة منذ ذلك الوقت، لم يتنقل الإشعاع الذي كان يخترق الكون في البداية بحرية. بل تشتت الجسيمات المشحونة التي احتواها الكون في بدايته.

لكن، بعد أن برد الكون، اتحدت الجسيمات المشحونة لتشكل ذرات متعادلة Neutral atoms عند درجة حرارة معينة معروفة بدرجة حرارة إعادة التركيب Recombination temperature. أعطى غياب الجسيمات المشحونة المتفككة الفوتون الحرية للتنقل من دون خوف. نتيجة لذلك، منذ ذلك الوقت وما بعد، لم تعد الجسيمات المشحونة تتنقل بنحو مستقل وأصبحت بدل ذلك مقيدة داخل الذرات. مع عدم وجود جسيمات مشحونة لتشتيتها، تتجه الفوتونات المنطلقة بعد إعادة التركيب مباشرة نحو تلسكوباتنا. لذلك عندما ننظر إلى إشعاع الخلفية الميكروية الكونية، نرى ذلك الوقت البدائي نسبياً.

من وجهة نظر قياسية، هذا مذهل. كان هذا في مرحلة مبكرة من حياة الكون – نحو 380,000 سنة بعد الانفجار الكبير (العظيم) Big Bang – حتى أن البنية لم تتشكل بعد. اتخذ الكون إلى حد ما الشكل البسيط الذي تقترحه الصورة الكونية الأولية لدينا. كان في الغالب متجانساً ومتناظراً. بمعنى أن درجة الحرارة كانت نفسها تقريباً في أي جزء تفحصه من السماء وفي أي اتجاه تختاره. ولكن تذبذباً ثانوياً في درجة الحرارة بمستوى واحد على عشرة آلاف هدد قليلاً هذا التجانس. تحمل قياسات هذه التذبذبات قدراً هائلاً من المعلومات حول محتويات الكون وتطوره اللاحق. وتتيح لنا النتائج استنتاج تاريخ توسع الكون والسمات الأخرى كما تخبرنا عن كمية الإشعاع، والمادة، والطاقة الموجودة، في ذلك الوقت واليوم، مما يقدم رؤى تفصيلية عن سمات الكون ومحتوياته.

لكي نفهم سبب غنى هذا الإشعاع القديم بالمعلومات، الأمر الآخر الذي يجب تأمله عن بداية الكون هو أنه عند وقت إعادة التركيب، عندما تمكنت الذرات المتعادلة من التشكل أخيراً، بدأت المادة والإشعاع في الكون التذبذب. فيما يعرف بـ *التذبذبات الصوتية Acoustic oscillations*، شد سحب الجاذبية Gravitational pull للمادة الأشياءَ إلى الداخل بينما دفعها ضغط الإشعاع إلى الخارج. تنافست هذه القوى بعضها مع بعض، مما أدى بالمادة المنهارة إلى التقلص والتوسع، الأمر الذي ولّد تذبذبات. حددت كمية المادة المعتمة مدى القوة الكامنة للجاذبية التي شدت الأشياء إلى الداخل، مقاومة بذلك القوة الخارجية للإشعاع. ساعد هذا التأثير في تشكيل التذبذبات، مما سمح لعلماء الفلك بقياس كثافة الطاقة للمادة المعتمة بكاملها التي كانت موجودة في ذلك الوقت. وبتأثير أشد، أثرت المادة المعتمة أيضاً في المدة الزمنية بين بدء المادة في التداعي Collapse (والذي يحصل عندما تتجاوز كثافة الطاقة في المادة كثافة الطاقة في الإشعاع) وبين وقت إعادة التركيب Recombination – عندما بدأت الأشياء في التذبذب.



[الشكل 3] رسم بياني يوضح الكميات النسبية للطاقة المخزنة في المادة العادية (الذرات)، والمادة المعتمة، والطاقة المعتمة. لاحظ أن المادة المعتمة 26% من كثافة الطاقة الإجمالية، ولكنها تشكل 85% من طاقة المادة لأن المادة تحتوي فقط على مجموع الذرات والمادة المعتمة، من دون الطاقة المعتمة.

الفطيرة الكونية

هذه كمية كبيرة من المعلومات. ولكن حتى من دون معرفة التفاصيل، يمكننا أن نفهم أن هذه القياسات دقيقة بنحو استثنائي، وأنها جعلتنا نثبت القيم الدقيقة لمقاييس كونية عديدة – بما في ذلك الكمية الصافية لكثافة الطاقة التي تحملها المادة المعتمة. لا تؤكد القياسات وجودَ الطاقة المعتمة والمادة المعتمة فحسب، بل تقيد جزء الطاقة الكوني الذي تحتويه أيضاً. إن نسبة الطاقة في المادة المعتمة نحو 26%، وفي المادة العادية 5%، وفي الطاقة المعتمة 69%. (انظر: الشكل 3). معظم طاقة المادة العادية تحمله الذرات، لهذا السبب يستخدم الرسم البياني الكوني "الذرات"، "المادة العادية" بشكل متبادل. بمعنى آخر، تحمل المادة المعتمة خمسة أضعاف الطاقة الموجودة في المادة العادية، أي أنها تحمل 85% من طاقة المادة في الكون. كان من المطمئن أن نتيجة مجموع المادة المعتمة الذي توصلنا إليها من إشعاع الخلفية الكونية الميكروي المقاس يتوافق مع القياسات السابقة من العناقيد المجرية – ومن ثم يعزز النتيجة المحققة من قياسات الخلفية الميكروية.

أكدت قياسات الخلفية الميكروية الكونية أيضاً وجودَ المادة المعتمة. لأن المادة المعتمة والمادة العادية تؤثران بطرق مختلفة في اضطرابات في إشعاع الخلفية الكونية الميكروي – الإشعاع الذي بقي حتى اليوم منذ

الانفجار الكبير – أكدت بيانات حول هذه الخلفية وجودَ المادة المعتمة، وقاست إضافة إلى ذلك كميتَها الموجودة حالياً. لكن الطاقة المعتمة – الشكل الغامض للطاقة الذي ناقشه الفصل السابق، والموجودة في الكون ولكن لا يحملها أي شكل من أشكال المادة – تؤثر في هذه التذبذبات أيضاً.

ولكن الاكتشاف الحقيقي للطاقة المعتمة الذي جاء من قياسات السوبرنوفا (مستعر أعظم) Supernova، قاده فريقان مستقلان من علماء الفيزياء – أحدهما بقيادة سول بيرلمتر Saul Perlmutter والآخر بقيادة آدم ريس Adam Riess وبراين شميت Brian Schmidt. تناول هذا الاكتشاف انعطافاً طفيفاً عن مسارنا لأن المادة المعتمة هي همنا الحقيقي. ولكن الطاقة المعتمة أيضاً مثيرة ومهمة بما يكفي لتستحق انعطافاً مختصراً هنا.

سوبرنوفا من النوع IA واكتشاف الطاقة المعتمة

أدى السـوبرنوفا من النوع IA دوراً مهماً في اكتشاف الطاقة المعتمة. ينجم السوبر نوفا IA عن انفجارات نووية للأقزام البيضاء *White dwarfs*، والتي هي المرحلة النهائية الحميدة ظاهرياً لتطور بعض النجوم بعد أن أحرقت كل الهيدروجين والهيليوم في نواتها عن طريق الاندماج النووي الحراري. عندما تفوق الكتلة حداً معيناً، تصبح الأقزام البيضاء غير مستقرة وتنفجر. مثل دولة غنية بالنفط عمدت إلى تصدير كل مواردها لتجد نفسها متورطة مع كثافة سكانية غير راضية على شفا الثورة، تمتص الأقزام البيضاء كثيراً من المادة قبل أن تصل كتلتها إلى حافة الانفجار أيضاً [1]. لأن الأقزام البيضاء التي تنفجر لتنتج السوبرنوفا IA لها الكتلة نفسها، تشع هذه السوبرنوفا بالسطوع نفسه تقريباً، لتجعلها ما يسميه علماء الفيزياء الفلكية الشموع المعيارية [2]Standard candles.

هذه السوبرنوفا IA هي مسبارٌ مفيد بشكل خاص لمعدل توسع الكون بسبب هذا الانتظام وأيضاً لأنها ساطعة وتسهل رؤيتها نسبياً، حتى وإن كانت بعيدة. علاوة على ذلك، تعد شمعة معيارية، لذا فإن سطوعها الظاهري يختلف وفقا لاختلاف بعدها عنا.

لذا إذا قاس علماء الفلك سرعة تقلص المجرة ومدى سطوعها، يمكنهم أن يحددوا معدل توسع الكون الذي توجد فيه المجرة، إضافة إلى بعد المجرة. بالتسلح بهذه المعلومات، يمكنهم أن يحددوا توسع الكون كدالة زمنية Function of time.

استـخدم فريقا بـحث في السوبرنوفا هذه الفـكرة لاكتشاف الطاقة المعتمة في العام 1998، عندما قاسا الانزياح الأحمر Redshifts للمجرات التي تقع فيها السوبرنوفا. الانزياح الأحمر هو انزياح في تردد الضوء الذي ترسله العناصر المتراجعة، والذي ينبئ عن سرعة تحرك شيء ما من مصدر ضوء أو صوت، مثل انخفاض حدة صوت صفارة سيارة الإسعاف عندما تمر بسرعة. وبمعرفة الانزياح الأحمر والسطوع في السوبرنوفا التي درسوها، تمكن الباحثون من قياس معدل توسع الكون.

لدهشتهم، وجدوا أن السوبرنوفا الحمراء أعتم من المتوقع، مما يدل على أن السوبرنوفا كانت أبعد مما توقعوه بحسب الافتراضات غير التقليدية حول معدل توسع الكون. أدت ملاحظاتهم إلى استنتاج مذهل: أن هناك مصدر طاقة غير متوقع يسرّع معدل توسع الكون. الطاقة المعتمة تلائم هذا الوصف، بما أن تأثير جاذبيتها يجعل الكون يتوسع بمعدل سرعة متزايد مع الوقت. وهكذا، إضافة إلى قياسات الخلفية الميكروية الكونية، برهنت قياسات السوبرنوفا على وجود الطاقة المعتمة.

ختام المادة المعتمة

إن التوافق بين القياسات اليوم جيد جداً إلى درجة أن علماء الكوزمولوجيا يتحدثون عن النموذج ΔCDM، حيث يشير Δ إلى "لامدا" (الحرف الحادي عشر في الأبجدية اليونانية)، و CDM هي اختصار لعبارة "المادة المعتمة الباردة" Cold dark matter. لامدا هو الاسم الذي يستخدم أحياناً للتعبير عن الطاقة المعتمة التي نعلم الآن أنها موجودة. مع توزع الطاقة المعتمة، والمادة المعتمة، والمادة العادية كما في رسم الفطيرة الكونية البياني، تتوافق جميع القياسات حتى اليوم مع التنبؤات.

يبرهن قياس إشعاع الخـلفية الميكروية الكونية الدقيق - واضطراباته الضئيلة ولكن غنية الكثافة- على عديد من المعايير الكونية، بما فيها كثـافات الطاقة في المادة العادية، والمادة المعتمة، والطاقة المعتمة – إضافة إلى عمر وشـكل الكون. إن التوافق الممتاز بين البيانات الحديثة المستمدة من مسبار ويلكينسون لقياس التباين الميكروي (اختصارا: المسبار WMAP) والأقمار الاصطناعية التابعة للمرصد الفضائي بلانك Planck satellites التي سنتطرَّق إليها في الفصل الخامس، وبين البيانات المستمدة من مشاهدات أخرى مثل التي حُصِل عليها من دراسة السوبرنوفا IA، يعد توثيقاً مهماً للنموذج الكوني.

ولكنْ هناك برهان مهم أخير عن وجود المادة المعتمة سأتطرق إليه أيضاً. وهذا البرهان – ربما يكون الأكثر أهمية بالنسبة إلينا – هو وجود تركيبة مثل المجرات. من دون المادة المعتمة، ما كان لدى هذه البنية الوقت لتتشكل.

إن تقدير دور المادة المعتمة المحوري في هذه العملية المهمة يتطلب فهماً بسيطاً للمراحل السابقة من تاريخ الكون. لذا قبل الوصول إلى تشكيل التركيب، فلنتطرقْ أولاً إلى علم الكوزمولوجيا، دراسة طريقة تغير الكون مع مرور الزمن.

عندما أُخبِر الناس أنني أعمل في علم الكوزمولوجيا (الكونيات) Cosmology، يخطئونني عدة مرات على أنني خبيرة تجميل Cosmetologist، ما أجده مضحكاً جداً نظراً إلى عدم ملاءمتي لهذه الحرفة. ولكن هذا الخطأ شجعني على أن أستخرج معاني هذه المفردات، التي – إن لم تكن تنصت بانتباه – يمكن أن تبدو متماثلة بشكل لافت. علمني قاموس علم أصل الكلمات الإلكتروني Online Etymology Dictionary، الذي فسر أن كلتا الكلمتين مشتقة من اللفظة المحورة في اللاتينية من الكلمة اليونانية *kosmos*، بأن الخطأ مبرر تقريباً. ربما كان فيثاغورس من ساموس هو أول من استخدم كلمة kosmos في القرن السادس قبل الميلاد للإشارة إلى الكون Universe. ولكن من نحو 1200 بعد الميلاد، أصبح معنى cosmos "النظام، والانضباط، والترتيب". ولكن تغدو الكلمة محببة إلا أنه في منتصف القرن التاسع عشر، عندما قدم المستكشف والعالم الألماني ألكسندر فون هومبولت Alexander von Humboldt سلسلة من المحاضرات، التي كتبها في أطروحة بعنوان Kosmos، تركت هذه الأطروحة الأثر في نفوس عديد من القراء، بمن فيهم الكتّاب إمرسون Emerson، وثورو Thoreau، وبو Poe، ووتمان Whitman. ويمكنك التندر بأن كارل ساغان Carl Sagan هو من أعاد إطلاق مسلسل Kosmos الشهير.

أما الكلمة Cosmetic، في المقابل، فتعود إلى أربعينات القرن السابع عشر – وهي مشتقة من الكلمة الفرنسية Cosmétique، التي انحدرت بدورها من الكلمة اليونانية Kosmetikos، بمعنى "محترف التجميل والتزيين". يشرح القاموس الإلكتروني، الذي يقدم معنى مزدوجا أشك في أن قاطني لوس آنجلس فقط يمكنهم فهمه، بأن {لكلمة Kosmos معنى ثانويا مهما: الزينة، ملابس النساء، الزخرفة، إضافة إلى الكون، العالم}. بأي حال من الأحوال، التشابه – والالتباس المحرج – الذي أواجهه ليس عبثياً بكامله. فكلتا الكلمتين "Cosmology: كوزمولوجيا" و"Cosmetology": التجميل مشتقةٌ من كلمة *Kosmos*. مثل الوجه، يتحلى الكون بالجمال وبالنظام المضمّن فيه.

أصبح علم الكوزمولوجيا – علم تطور الكون – الآن علما قائما بحد ذاته. وقد دخل مؤخراً عصراً أثمرت فيه التطورات الثورية – التجريبية والنظرية – عن المزيد من الفهم المعمق والمفصل أكثر مما قد ظن الناس بإمكانيته قبل ثلاثين سنة. قدمت التقنيات المتطورة المزودة بالنظريات المتعمقة بالنسبية العامة وفيزياء الجسيمات صورة مفصلة عن المراحل الأولى للكون، وكيف تطور إلى الكون الذي نراه الآن. يشرح الفصل التالي مدى عمق وبعد هذه التطورات وإلى أي مدى أوصلتنا في فهم تاريخ الكون. ولكن قبل استكشاف هذه الإنجازات المدهشة، أود أولاً أن أغوص في الفلسفة بإيجاز لكي أوضح ما يخبرنا وما لا يخبرنا به العلم حول الإجابة عن بعض أهم وأقدم أسئلة البشرية.

أسئلة من دون أجوبة

الكوزمولوجيا علمٌ يدور حول تساؤلات كبرى – لا شيء أقل من كيفية نشوء الكون وتطوره بعد ذلك إلى حالته الحالية. قبل الثورة العلمية، حاول الناس الإجابة عن مثل هذه الأسئلة بالأساليب المتوافرة بين أيديهم فقط، أي الفلسفة والملاحظات المحدودة. تبين أن بعض الأفكار صحيحة ولكن – من غير المفاجئ – كثيراً غيرها كان خاطئاً.

اليوم أيضاً، على الرغم من كل تطوراتنا، لا يسع الناس سوى الالتفات إلى الفلسفة عندما يفكرون في الكون والأسئلة التي لم نجد لها إجابة بعد – ما يجبرنا على مواجهة الفرق بين الفلسفة والعلم. يهتم العلم بالأفكار التي يمكننا على الأقل من حيث المبدأ أن نتأكد من صحتها أو نستبعدها من خلال التجارب والملاحظات. أما الفلسفة، بالنسبة إلى العالِم على الأقل، تتعلق بالأسئلة التي لن نجيب عنها بنحوٍ موثوق به على الإطلاق. أحياناً تتأخر التقنيات الضرورية لتأكيد النظرية، ولكن نود أن نعتقد ولو من حيث المبدأ على الأقل- أن الاقتراحات العلمية سيمكن إثباتها أو نفيها.

هذه يترك العلماء مع معضلة. من شبه المؤكد أن الكون يتوسع إلى ما بعد المجال الذي يمكننا رصده. إذا كانت سرعة الضوء محدودة بالفعل وإن كان كوننا موجوداً مدةً محددة من الوقت، يمكننا عندها أن ندخل إلى منطقة محدودة من المساحة – مهما تقدمت التقنيات. يمكننا أن نرى هذه المناطق التي يمكن الوصول إليها عن طريق أشعة الضوء – أو شيء آخر ينتقل بسرعة الضوء – خلال فترة حياة الكون. فقط من هذه المناطق يمكن لإشارة أن تصل إلينا في الوقت الذي وُجِد فيه الكون. أما أي شيء أبعد من ذلك – أبعد مما يطلق عليه الفيزيائيون *الأفق الكوني Cosmic horizon* – فهو ممتنع على أي رصد يمكننا الاضطلاعُ به في الوقت الحالي.

وهذا يعني أن العلم بأصدق أشكاله لا ينطبق على ما وراء هذا المجال. لا أحد يمكنه أن يثبت أو ينفي، عن طريق التجربة، أي تنبؤات تنطبق على ما وراء الأفق. بحسب تعريفنا للعلم، في هذه المناطق النائية تسود سلطة الفلسفة. هذا لا يعني أن العلماء الفضوليين لا يفكرون إطلاقاً في االأسئلة الكبرى حول المبادئ الفيزيائية أو العمليات التي تنطبق عليها. في الواقع كثيرون يفعلون ذلك. لا أريد أن أهمش مثل هذه التساؤلات – يمكنها عادة أن تكون عميقة ومدهشة. ولكن نظراً إلى القيود،، لا يمكنك الوثوق بإجابة عالم في هذا المجال – على الأقل ليس أكثر من أي شخص آخر. لكن، لأنني أتعرض للسؤال مراراً، سأستغل هذا الفصل لأقدم رأيي حول بعض الأسئلة الكبرى التي يود الناس عادة الحديث عنها.

أحد الأسئلة التي أسمعها مراراً هي لماذا هناك شيء بدلاً من لا شيء. على الرغم من أن أحداً منا لا يعلم السبب الحقيقي، سأقدم إجابتيّ الاثنتين. الأولى، المفروغ منها والتي لا يمكن إنكارها، هي أنك ما كنت لتكون هنا لتسأل هذا السؤال وأنا ما كنت لأكون هنا لأجيب عنه إن لم يكن هناك شيء. ولكن إجابتي الأخرى هي أنني أعتقد أن شيئاً ما أكثر ترجيحاً. في النهاية، لا شيء في حد ذاته مميز جداً. إذا كان لديك صف من الأرقام، "الصفر" هو نقطة متناهية الصغر بين لا محدودية الأرقام المحتملة التي يمكن أن تختارها. "لا شيء" Nothing مميز جداً إلى درجة أنه من دون أي سبب، ما كنت لتتوقع أن يميز حالة الكون. ولكن حتى السبب هو "شيء". على الأقل أنت في حاجة إلى قوانين فيزيائية لتفسر حوادث غير عشوائية. ولا بد أن تكون الحالة التي تنطبق هنا "شيئاً". على الرغم من أنها تبدو طرفة، أنا أؤمن حقاً بهذا. قد لا تجد دائماً ما تبحث عنه، ولكنك لا تعثر بنحوٍ عشوائي على "لا شيء".

ولكن هناك سؤال علمي، أكثر منه فلسفياً، يُطرح عندما يفكر الفيزيائيون في المادة التي تكوننا – الشيء الذي من المفترض أن نفهمه. لم يوجد في كوننا كثير من المادة التي تصنعنا – البروتونات، النيوترونات، الإلكترونات؟ على الرغم من أننا نفهم قدراً كبيراً عن المادة العادية، لا نفهم بنحوٍ تام سبب وجود كثير منها حتى الآن. إن كمية الطاقة في المادة العادية هي مشكلة لم تُحَل.. نحن لا نعلم حتى الآن لِمَ بقيت بوفرة بهذا الشكل حتى اليوم.

توصلنا هذه المشكلة إلى سؤال لماذا لم يكن هناك مقدار متكافئ من المادة Matter *وضديد المادة Antimatter*. ضديد المادة هو المادة التي لها كتلة المادة العادية نفسها ولكن بشحنات كهربائية معاكسة. تدلنا النظريات الفيزيائية إلى أنه لا بد من وجود جسيم ضديد مادة لكل جسيم مادة، على سبيل المثال، معرفتنا أن لإلكترون شحنة (1-)، تدلنا على وجوب وجود ضديد جسيم – يسمى بوزيترون – بالكتلة نفسها

ولكن بشحنة مضادة (1+). لتجنب أي التباس، دعني أوضح بصراحة أن ضديد المادة ليس هو المادة المعتمة. تحمل ضديد المادة نفس أنواع شحنات المادة العادية ومن ثم يتفاعل مع الضوء. ولكن الفرق الوحيد هو أن شحنات ضديد المادة هي عكس شحنات المادة المرتبطة.

لأن ضديد المادة يحمل شحنات معاكسة لمادتنا العادية، فإن الشحنة الصافية للمادة وضديد المادة هي صفر. لأن المادة وضديد المادة معاً لا يحملان أي شحنة، فإن قانون حفظ الشحنة Charge conservation ومعادلة آينشتاين الشهيرة $E = mc^2$ تخبرنا بأن المادة يمكن أن تجتمع مع ضديد المادة لتنبعث على شكل طاقة صرفة ليست لها شحنة أيضاً.

كنا نتوقع أنه بعد أن برد الكون، كل المادة المعروفة، بنحو أساسي، ستتحلل مع ضديد المادة، بمعنى أن المادة وضديد المادة كانا سيندمجان ليتحولا إلى طاقة صرفة، ومن ثم تتلاشى. ولكن لأننا هنا لمناقشة هذه المسألة، من الواضح أن القضية لم تكن كذلك. بل بقيت لدينا المادة – التي هي 5% من طاقة الكون التي تراها في الشكل 3 – لذا لا بد أن كمية المادة في الكون أعظم من كمية ضديد المادة. ميزة حساسة للكون الذي نعيش فيه – ولأنفسنا – هي أنه في تباين مع التوقعات الحرارية، تصمد المادة العادية وتبقى بكميات كافية لتوليد الحيوانات والمدن والنجوم. وهذا ممكن فقط لأن المادة تهيمن على ضديد المادة – هناك حالة من عدم التماثل بين المادة وضديد المادة. لو كانت الكميات متساوية دائماً، لوجدت المادة وضديد المادة كلٌّ منهما الآخر، وتحللا واختفيا.

من أجل أن تبقى المادة موجودة حتى اليوم، لا بد من تكوين حالة من اللاتناظر بين المادة وضديد المادة في وقت ما في بداية الكون. اقترح الفيزيائيون عدة سيناريوهات عملية لما يمكن أن يكون قد ولّد هذا الاختلاف في التوازن، ولكننا لا نعلم حتى الآن إن كان أيٌّ منها صحيحاً. يبقى أصل اللاتناظر إحدى أهم المشكلات التي لم يُجَبْ عنها في الكوزمولوجيا. وهذا يعني فضلاً عن أننا لا نفهم العناصر المعتمة، نحن لا نفهم المادة العادية تمام الفهم – القطعة الصغيرة من رسم الفطيرة الكونية البياني الذي يمثل المادة المعروفة. لا بد أن شيئاً مميزاً قد حدث في وقت مبكر من مراحل تطور الكون ليفسر سبب بقاء هذه القطعة في الفطيرة.

هناك سؤال ثانٍ لم يُجَبْ عنه حالياً، وهو ماذا حصل تحديداً في أثناء الانفجار الكبير. يشير العلماء والصحافة الشعبية مراراً إلى الانفجار الكبير الذي حدث عندما كان عمر الكون أقل من 10^{-43} ثانية وكان حجمه 10^{-33} سم، بل و"يرسمون" الانفجار بصور ساحرة متعددة الألوان. ولكن مصطلح "الانفجار الكبير" مضلل، كما سأناقش لاحقاً في الفصل التالي. ابتكر عالم الفلك فريد هويل Fred Hoyle، الذي كان يفضل كوناً ساكناً، هذا المصطلح في العام 1949 ساخرا في برنامجه الإذاعي على بي بي سي ليشير إلى هذه النظرية التي لا يؤمن بها.

بغض النظر عن موقفك تجاه دراسة الانفجار الكبير، الذي يصف بنجاحٍ تطورَ الكون بعد نشوء الكون الذي نعرفه بجزء من الثانية، لا أحد يعلم ما حدث في الوقت السابق من تلك اللحظة. يتطلب توصيف موثوق للانفجار الكبير – وربما ما حدث قبل ذلك – نظرية في الجاذبية الكمية Quantum gravity. في نطاقات المسافة الضئيلة المرتبطة بهذا الوقت المبكر، تعد ميكانيكا الكم والجاذبية في غاية الأهمية، ولم يعثر أحد حتى الآن على نظرية قابلة للحل تنطبق على نظام المسافة متناهي الصِّغَر هذا. سوف نتعرف على بداية الكون فقط عندما نعلم المزيد عن العمليات الفيزيائية في نطاق المسافة الضئيل هذا. وعندها أيضاً من المرجح أن تكون الملاحظات لبرهنة الاستنتاجات مستحيلة.

هناك سؤال آخر تستحيل الإجابة عنه وكثيراً ما أسمعه وهو: "ماذا حدث قبل الانفجار الكبير؟" من المفترض أن الإجابة عن هذا السؤال تتطلب معرفة أوسع من فهم الانفجار الكبير بحد ذاته. فنحن لا نعلم ماذا حدث في أثناء الانفجار الكبير، ولا أنا ولا أي أحد يعلم ما جاء قبله. ولكن قبل أن يخيب أملك بهذا الإغفال،

دعني أطمئنك أنك من المحتمل أن تجد أي إجابة لهذا السؤال غير مرضية. إما أن الكون قد وُجد في مدة زمنية لا نهائية، وإما أنه بدأ في وقت محدد. يمكن أن تكون الإجابتان مقلقتين، ولكنْ هذان هما الخياران.

فلنتوسَّعْ في هذا قليلاً، إذا وُجد الكون منذ الأزل وكان الانفجار الكبير جزءاً منه، فإما أن كوننا كان كلَّ ما هو موجود، وإما أن تكون الأكوان الأخرى قد نشأت من انفجارات كبيرة خاصة بها. "أكوان متعددة" Multiverse هو مصطلح يرتبط بكون توجد فيه أكوان أخرى إضافة إلى كوننا. بحسب هذا السيناريو، سيكون هناك عديد من المناطق المتوسعة – وكل واحدة منها تشتمل على كونها الخاص.

يتركنا هذا الاستنتاج مع ثلاثة خيارات. إما أن يكون كوننا قد بدأ بالانفجار الكبير، وإما أن الكون موجود منذ الأزل ولكن بدأ أخيراً في التوسع كما تتنبأ نظرية الانفجار الكبير، أو أننا واحد من عدة أكوان نشأت من كون/كون متعدد كان موجوداً دائماً. هذا يغطي جميع الاحتمالات. يبدو الأخير هو الأكثر ترجيحاً في اعتقادي بحيث إنه لا يفترض أن عالمنا أو حتى كوننا الخاص مميز، وهذا استنتاج مطروح منذ زمن كوبرنيكوس. كما يوحي هذا الخيار أنه كما أن الحد المكاني من الكون – على الأقل بحسب طريقة تفكيري – أكثر ترجيحاً بأن يكون لا محدوداً من حيث الحجم، فمن غير المرجح أن يكون للكون المتطور زمن بداية أو نهاية – حتى على الرغم من أن كوننا ذاته قد يكون كذلك. ربما يكون وجود كون متعدد ناشئ ومتلاشٍ في النهاية هو الأكثر إرضاء بين الاحتمالات الثلاثة غير القابلة للإدراك بنحوٍ تام.

يقودني هذا إلى التساؤل الفلسفي الأخير – الذي يثيره السؤال السابق – وهو إذا كان هذا الكون المتعدد موجوداً. تقترح النظريات الفيزيائية الحالية ترجيح وجود كون متعدد، وخاصة نظراً إلى الحلول الممكنة العديدة في نظريات الجاذبية الكميّة كما صِيغت حالياً. سواء ما إذا كانت هذه الحسابات قابلة للتدقيق أما لا، سأراهن بوجود أكوان أخرى لا يمكن الوصول إليها. ولِمَ لا؟ نظراً إلى أننا نعلم قيود القوانين الفيزيائية والتقنية الحالية، من قصر النظر حرفياً ومجازياً أن نقرر أنه لا توجد أكوان أخرى. لا شيء في عالمنا يتعارض مع وجود كون متعدد.

ولكن هذا لا يعني أننا سنتمكن من معرفة ذلك يوماً ما. إن لم يكن هناك شيء يسافر أسرع من سرعة الضوء، فإن أي مناطق نائية – خلف الأفق الكوني، ستكون خارج حدود ملاحظتنا. مع ذلك قد تحتوي هذه المناطق الأخرى من حيث المبدأ أكواناً أخرى تنفصل بنحوٍ تام عن كوننا. من المحتمل العثور على بعض الإشارات لأكوان أخرى في حالات تتواصل فيها الأكوان المنفصلة بعضها مع بعض على مرِّ الزمن. ولكن هذا من غير المرجح، وبوجهٍ عام لا يمكن الوصول إلى أكوان أخرى.

من أجل قرائي المخلصين، سأثير الآن حديثا جانبيا لأوضح أنني بمناقشة الأكوان المتعددة، أنا لا أشير إلى سيناريوهات الأبعاد المتعددة التي وصفتُها في كتاب ممرات ملتوية *Warped Passages*. من المحتمل أيضاً وجود أكوان أقرب من الأفق ولكن منفصلة عنا عبر بُعد فضائي آخر – بُعد غير الأبعاد الثلاثة التي نلاحظها: يمين-يسار، أعلى-أسفل، وأمام-خلف. على الرغم من أن أحداً لم يرَ مثل هذا البعد، من الممكن وجوده ومن حيث المبدأ يمكن أيضاً وجود كون يفصلنا عنه هذا البعد. يعرف هذا النوع من الكون باسم العالم الغشائي *Braneworld*. كما يعلم من قرأ كتابي الأول، من المحتمل أن تتمتع العوالم الغشائية التي تثير اهتمامي أكثر من غيرها بعواقب قابلة للملاحظة لأنها ليست بعيدة جداً بالضرورة لكن العوالم الغشائية بوجهٍ عام ليست ما يقصده الناس عند الحديث عن سيناريو الكون المتعدد الأكثر عموماً والذي يستوجب أكواناً منفصلة عديدة لن تتفاعل بعضها مع بعض حتى بالجاذبية. الأكوان المتعددة بعيدة جداً حتى إلى درجة أن وجود شيء يسافر بسرعة الضوء من واحد من هذه الأكوان الأخرى لن يكون لديه الوقت ليصل إلينا في فترة حياة كوننا هذا.

مع ذلك، هناك كثير من الاهتمام بفكرة الكون المتعدد في الخيال الشعبي. كنت أتحدث أخيراً مع صديق كان متحمساً جداً لفكرة الكون المتعدد ولم يدرك سبب عدم تحمسي لهذه الفكرة مثله بالضرورة. في اعتقادي السبب الأول هو الذي ذكرته أعلاه: في أغلب الاحتمالات، لن نعلم على نحو مؤكد ما إذا كنا نعيش في كون متعدد. حتى إن وُجِدت أكوان أخرى، من المحتمل أن تبقى غير قابلة للاستكشاف. أشك في أنه، وكثيرين

غيره، يحبذون هذه الفكرة؛ فهو يعتقد أن نسخة منه تعيش في واحد من هذه العوالم البعيدة. من باب التوضيح، أنا لا أؤمن بوجهة النظر هذه. في حال وجود أكوان أخرى، من المرجح أنها لا تشبه كوننا. من المحتمل أنها لا تحتوي على نفس أشكال المادة أو القوى التي لدينا. إذا كانت هناك حياة لديها، فمن المرجح أننا لن نتعرف عليها وربما لن نتمكن من استشعارها في المقام الأول – حتى إن لم تكن بعيدة جداً. سيكون العدد اللامتناهي من الملتقيات التي تخلق كائناً بشرياً واحداً أقل ترجيحاً. بعد أن فسرت كيف – حتى مع وجود عديد من الأكوان الأخرى – يمكن أن يكون هناك كون أكبر من الاحتمالات، بدأ صديقي يرى وجهة نظري.

في الحقيقة، حتى إن ثبت سيناريو الكون المتعدد، ستكون معظم الأكوان الأخرى واهية جداً وإما أنها ستنهار وإما ستنفجر، وفي هذه الحالة ستتحلل إلى العدم بنحوٍ آني. قلة فقط، مثل كوننا، قد تعيش فترة طويلة بما يكفي لتطور تركيبة وربما حياة أيضاً. على الرغم من منظور كوبرنيكوس المتبصر، يبدو كوننا الخاص أنه يمتلك عدداً من السمات المميزة – سمات تسمح بوجود المجرات، المجموعة الشمسية، والحياة. يحاول البعض أن يفسر السمات الخاصة بكوننا بافتراض وجود أكوان متعددة، واحد منها على الأقل له سمات خاصة نطلبها نحن من أجل بقائنا. عديد ممن يفكرون بهذه الطريقة يجربون التفكير الإنساني، الذي يحاول تبرير سمات خاصة لكوننا على أساس أنها جوهرية للحياة – أو على الأقل للمجرات التي تدعم الحياة. المشكلة هنا هي أننا لا نعلم أي السمات محددة من ناحية إنسانية وأيها مبنية على قوانين فيزيائية جوهرية، أو أي السمات أساسية للحياة وأيها أساسية ببساطة للحياة التي نراها. قد يكون التفكير الإنساني صحيحاً في بعض المواضع، ولكن لدينا المشكلة المعتادة وهي أننا لا نعلم كيف نختبر الأفكار. بأغلب الاحتمالات، سوف نستبعد مثل هذه الأفكار فقط إذا حلت محلها فكرة أكثر تنبُّئية.

إن أفكاراً مثل التي نُوقشت أعلاه هي تنبُّؤات. إنها مثيرة للاهتمام بنحوٍ خاص، ولكن ليست لدينا أجوبة – على الأقل ليس في الوقت القريب. في بحثي، أفضل أن أفكر بـ"الكون المتعدد" لمجتمعات المادة الموجودة هنا والتي يمكننا أن نأمل أن نفهمها. أنا أستخدم المصطلح مجازياً، ولكنه ليس بعيداً عن الحقيقة. كون من المادة المعتمة موجود أمام أعيننا. ومع ذلك لا نتفاعل معه بوجه عام ولا نعلم حتى الآن ما هو. ولكن الفيزياء التجريبية والنظرية توسع حالياً معرفتنا حول ما يمكن أن يكون هذا "الكون المعتم". قد نعرف الإجابة عما قريب، ومثل هذا الاكتشاف سيستحق الانتظار.

4

بداية البداية تقريباً: مكان مناسب للبدء

أذهل فيزيائي نظري روسي مرح وصريح الجميع المجتمعين لتناول القهوة عندما وصف الندوة التي كان يخطط لها في الأسبوع التالي. الندوة في الفيزياء هي حديث عام موجه إلى الطلبة، وزملاء ما بعد الدكتوراه، والأساتذة – كلهم لديهم خلفية في الفيزياء، وإن لم تكن بالضرورة مخصصة في مجال بحث المتحدث الضيق. كان اقتراح هذا الفيزيائي بحد ذاته عن ندوته هو "سأتحدث عن الكوزمولوجيا (الكونيات) Cosmology". في ذلك الوقت ربما كانت الإشارة عامّة بعض الشيء – ففي المجمل، الكوزمولوجيا هو فرع معرفة كامل – وجادل العالِم بأن هناك بعض الأفكار والكميات التي تستحق القياس في الكوزمولوجيا، وأنه يمكنه أن يغطيها كلها – إضافة إلى مساهمته الخاصة – في حديث لا يتجاوز ساعة من الزمن.

سأدعك تكون الحكم فيما إذا كانت وجهة النظر المبالغ فيها هذه في الكوزمولوجيا صحيحة حقاً – للعلم أنا أشك في ذلك. ما زال هناك كثير من القضايا التي تحتاج إلى البحث والفهم. ولكن حقاً، جزء من جمال بداية تطور الكون Universe هو أنه بسيط من عدة نواحٍ على نحو مفاجئ. بالنظر إلى السماء التي يدرسها علماء الفلك والفيزياء اليوم، يمكننا أن نستنبط الحقائق حول تركيب ونشاطات الكون منذ بلايين السنين. في هذا الفصل، سنتعمق في العملية المذهلة لفهمنا تاريخَ الكون التي قدمتها لنا النظريات والقياسات الجميلة في القرن الماضي.

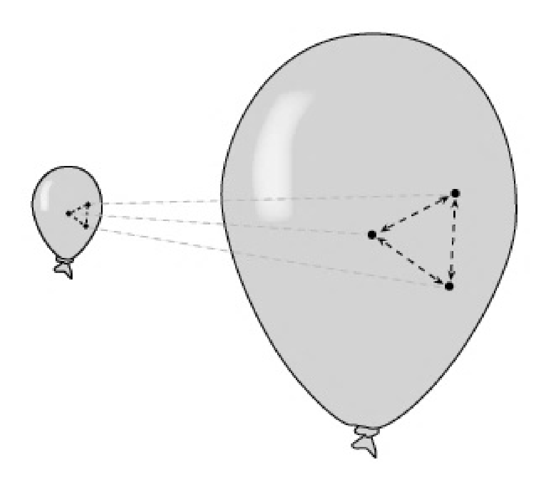
نظرية الانفجار الكبير

لا تتوافر لدينا الأدوات كي نَصِف لحظات البداية على نحوٍ موثوق به. ولكن عدم معرفة كيفية بدء الكون لا يعني أننا لا نعلم الكثير. على عكس اللحظات الأولى، التي لا يمكن لنظرية معروفة أن تصفها، خضع تطور الكون بعد جزء صغير من الثانية من بدايته لقوانين الفيزياء الراسخة. بتطبيق معادلات النسبية واستخدام الافتراضات المبسطة حول محتويات الكون، تمكن الفيزيائيون من تحديد قدر كبير من سلوك الكون بعد بدئه بمدة زمنية صغيرة جداً – ربما بعد 10^{-36} ثانية تقريباً – حيث تنطبق نظرية الانفجار الكبير، التي تصف توسُّعَ الكون. كان الكون في هذا الوقت المبكر مملوءاً بالمادة والإشعاع الذي كان متجانساً ومتناظراً – نفسه في كل الأماكن والاتجاهات – لذلك فإن كميات قليلة منه كافية لتصف السمات الفيزيائية الأولية. يجعل هذا التوصيفُ التطور البدائي للكون بسيطاً ومفهوماً وقابلاً للتنبؤ.

إن محور نظرية الانفجار الكبير هو توسع الكون. في عشرينات وثلاثينات القرن العشرين، حلّ كل من الخبير بالأرصاد الجوية الروسي ألكسندر فريدمان Alexander Friedmann، والقس والفيزيائي البلجيكي جورج لوميتر Georges Lemaître، وعالم الرياضيات والفيزياء الأمريكي هاورد بيرسي روبرتسون Howard Percy Robertson، وعالم الرياضيات البريطاني آرثر جيفري ووكر Arthur Geoffrey Walker – الأخيران يعملان معاً – حلّوا معادلات آينشتاين عن النسبية العامة واستنتجوا أنه لا بد أن الكون ينمو (أو يتقلص) مع مرور الزمن.

علاوة على ذلك بادروا بحساب طريقة استجابة معدل توسع المساحة لتأثير جاذبية المادة والإشعاع، اللذين تتغير كثافة طاقتهما مع تطور الكون.

لعل توسع Expansion الكون مفهوم غريب، نظراً إلى أنه من المحتمل جدا أن الكون لا مُتَناهٍ. ولكن المساحة بحد ذاتها هي ما يتوسع، بمعنى أن المسافة بين العناصر كالمجرات تتزايد مع مرور الوقت. عادة ما أُسأل: "إذا كان الكون يتوسع، فإلَامَ يتوسع؟". الإجابة هي أنه لا يتوسع إلى أي شيء. المساحة هي التي تتزايد. إذا تخيلت الكون كسطح بالون، البالون بحد ذاته يتوسع. (انظر: الشكل 4). إذا وضعت إشارة على نقطتين من سطح البالون، فستتباعد هاتان النقطتان أكثر عند نفخ البالون، تماماً كما تتباعد المجرات بعضها عن بعض في كون متوسع. إن صورتنا التشبيهية غير مثالية لأن سطح البالون ثنائي الأبعاد فقط ويتوسع فعلياً إلى مساحة ثلاثية الأبعاد. ينطبق التشبيه فقط إذا تخيلت سطح البالون هو كل ما هو موجود – إنه مساحة بحد ذاته. إذا كان الأمر صحيحاً – حتى مع عدم وجود شيء ليتوسع إليه – مع ذلك ستبقى الإشارتان تتباعدان كلٌّ منهما عن الأخرى.



[الشكل 4] تتباعد المجرات بعضها عن بعض مع توسع الكون، مثلما تتباعد نقاط على بالون عند نفخه.

كون البالون

لصورة تشبيهية أفضل، فقط المساحة بين النقاط المحددة ستتوسع – وليست النقاط نفسها. حتى في كون متوسع، النجوم والكواكب أو أي شيء آخر مقيد بقدرٍ كافٍ بأي قوى أخرى أو بتأثير جاذبي لن يتعرض للتوسع الذي يبعد المجرات بعضها عن بعض.حتى الذرات، التي تتألف من النواة والإلكترونات التي تبقى في تقارب بفعل القوة الكهرومغناطيسية لا يزداد حجمها. وكذلك التراكيب الكثيفة نسبياً والمقيدة بقوة مثل المجرات – أو أجسامنا، التي لها كثافة تزيد ترليون ضعف عن متوسط كثافة الكون. تطبق هذه القوة المسببة للتوسع على جميع الأنظمة المقيدة الكثيفة أيضاً، ولكن لأن مجموع القوة الأخرى أشد بكثير، لا يتمدد حجم أجسامنا والمجرات مع توسع الكون – أو إذا كانت تتزايد، فهو تزايد بمقدار ضئيل بحيث لن نلاحظ أو نقيس تأثيره. المادة المقيدة بقوة أكثر من القوة المسببة للتوسع تبقى بالحجم نفسه. فقط المسافة بين مثل هذه العناصر هي ما يزداد بحيث يجعلها البعد المتزايد متباعدة بعضها عن بعض.

من المعروف أن آينشتاين اشتق توسع الكون أول مرة من معادلة في النسبية. ولكنه فعل ذلك قبل قياس أي توسع، لذلك لم يثبت أو يؤيد نتيجته. في محاولة للتوفيق بين تكهنات نظريته والكون الساكن، قدم آينشتاين مصدرا جديداً للطاقة بدا له كأنه يلغي التوسع المفترض في النظرية. إلا أن إدوين هابل أثبت أن هذا

الحل مضلل في العام 1929 عندما اكتشف أن الكون يتوسع بالفعل، والمجرات تتباعد بعضها عن بعض مع مرور الزمن (بنحوٍ لا يصدق، كمراقب لم يثق بأي نظرية معينة، لم يتقبل هذا التفسير لنتائجه). تخلى آينشتاين بسرعة عن الفكرة المضللة التي قدمها، والمعروف (ربما كان تلفيقا) أنه دعاها "أكبر أخطائه".

لكن، لم يكن التعديل خطأ تماما لأن نوع الطاقة الذي اقترحه آينشتاين موجود بالفعل. أظهرت قياسات حديثة أن النوع الجديد من الطاقة الذي أضافه، والذي ندعوه الآن "الطاقة المعتمة" Dark energy – وإن لم يكن من الكمية أو النوع الذي سيحد من توسع الكون المتسارع – هو ضروري لتفسير المشاهدات الحديثة حول التأثير المضاد تماماً – وهو توسع الكون المتسارع. ولكني أعتقد أن آينشتاين ظن أن خطأه الفادح – إذا كان فعلاً وصفه كذلك – هو عدم ملاحظة صحة ومغزى تَنَبُّئه الأولي حول التوسع، الذي يمكن أن يعد تنبؤا أساسياً لنظريته.

من باب الإنصاف، قبل أن يقدم هابل نتائجه، كان يُعرف القليل جداً عن الكون. فقد كان هارلو شابيلي Harlow Shapley قد قاس حجم درب التبانة ليكون بعرض 300,000 سنة ضوئية، ولكنه كان مقتنعاً بأن درب التبانة هو كل ما هو موجود في الكون. في عشرينات القرن العشرين، أدرك هابل أن هذا لم يكن صحيحاً عندما اكتشف أن العديد من السُّدم Nebulae – التي ظن شابيلي أنها غيوم من غبار استحقت بجدارة هذا الاسم غير الملهم – هي في الواقع مجرات أخرى، تبعد ملايين السنين الضوئية. مع نهاية عقد العشرينات، قدم هابل اكتشافه الأكثر شهرة – الانزياح الأحمر للمجرات *Redshift of galaxies* – الانزياح في تردد الضوء الذي دل العلماءَ على أن الكون يتوسع. يبين الانزياح الأحمر للمجرات – مثل انخفاض حدة صوت صفارة سيارة الإسعاف مع ابتعادها – أن مجرات أخرى تبتعد عن مجرتنا، مما يشير إلى أننا نعيش في كون تتباعد فيه المجرات.

اليومَ، نتحدث أحياناً عن ثابت هابل Hubble constant، وهو المعدل الحالي لتوسع الكون. إنه ثابت بحيث أن قيمته اليوم في أي مكان في الفضاء هي نفسها. ولكن الحقيقة أن ثابت هابل غير ثابت. إنه يتغير مع الوقت. في وقت مبكر من حياة الكون، عندما كانت الأشياء أكثر كثافة والتأثير التجاذبي أشد قوة، توسع الكون بسرعة أكبر بكثير من سرعته اليوم.

حتى وقت قريب جداً، بيّن نطاق واسع نسبياً من القيم "المقيسة" Measured لثابت هابل، الذي يقيس معدل التوسع اليوم، أننا لا نستطيع أن نثبِّت عمر الكون بدقة. يعتمد عمر الكون على معكوس Inverse ثابت هابل، فإذا كان القياس غير دقيق بمقدار الضعف، فكذلك سيكون عمر الكون.

أذكر أنني قرأت في الصحيفة عندما كنت صغيرة أن قياسات حديثة كانت السبب في تعديل عمر الكون بهذا المقدار. ومن دون معرفة أن هذا يمثل قياس معدل التوسع، أذكر دهشتي من التعديل الجذري. فأنّى يكون لشيء بأهمية عمر الكون أن يتغير؟ تبين أننا نستطيع أن نفهم مقداراً كبيراً عن تطور الكون على مستوى نوعي Qualitative level، حتى من دون معرفة عمره الصحيح. ولكن معرفة أكثر دقة لعمر الكون تعزز معرفة أفضل لمحتوياته والعمليات الفيزيائية المتضمنة التي تعمل فيه.

أصبح عدم اليقين هذا إلى حد ما تحت سيطرة أفضل. فقد قاست ويندي فريدمان Wendy Freedman، التي كانت حينها في مرصد كارنيغي، مع زملائها معدل التوسع ووضعت حداً نهائياً لهذا النقاش. في الحقيقة، لأن قيمة ثابت هابل مهمة جداً في الكوزمولوجيا، بُذِل جهدٌ جماعي لضمان أقصى دقة ممكنة. باستخدام مرصد هابل الفضائي Hubble Space Telescope (نظراً إلى الاسم، يبدو الاكتشاف منصفاً تماماً)، قاس علماء الفلك قيمة 72/كم/ث/ميغا فرسخ فلكي (أي أن شيئاً على بعد ميغا فرسخ فلكي Megaparsec يتحرك بسرعة 72 كم/ث) بمقدار دقة 11% أفضل بكثير من قياس هابل الأصلي وغير الدقيق بمعدل 500 كم/ث/ميغا فرسخ فلكي.

الميغا فرسخ فلكي (Mpc) هو مليون فرسخ فلكي، والفرسخ الفلكي، مثل الكثير من وحدات القياس الفلكية، هو أثر تاريخي مُتبَقٍّ من طريقة قياس المسافات في العصور السابقة. إنه نسخة مختصرة عن "ثانية

اختلاف المنظر" Parallax second وله علاقة بالزاوية المقابلة لعنصر ما في السماء، ولهذا السبب توجد وحدة زاويّة Angular unit في المقياس. وعلى الرغم من أن عديداً من علماء الفلك يستخدمون هذه الوحدة حتى الآن، كما يستخدمون قياسات تاريخية وغير حدسية، يفضل الغالبية ألا يفكروا بالفرسخ الفلكي. للتحول إلى ما هو ربما مقياس مسافة مألوف أكثر قليلاً، الفرسخ الفلكي هو نحو 3.3 سنة ضوئية. من محض المصادفة أن المقياس الغامض يساوي تقريباً المقدار المفسر مسبقاً.

قد تكون نتيجة مرصد هابل الفضائي الأكثر دقة لثابت هابل غير دقيقة بنسبة 10 إلى 15%، ولكن مقدار عدم اليقين لم يكن إلا بمقدار الضعف. تعتمد نتائج حديثة أكثر على قياس بيانات إشعاع الخلفية الميكروية الكونية لتكون أكثر دقة من ذلك. يُعرَف الآن عمر الكون بهامش خطأ بحدود بضع مئات ملايين السنين، وما زالت القياسات في تحسن. عندما كتبت كتابي الأول كان عمر الكون 13.7 بليون سنة، ولكن نعتقد الآن أنه أقدم بقليل – 13.8 بليون سنة مما يدعى الانفجار الكبير Big bang. لاحظ أنه ليس فقط ثابت هابل المتغير، ولكن اكتشاف الطاقة المعتمة التي ذكرتُها في الفصل الأول، هو ما أدى إلى هذه النتيجة الأدق، لأن عمر الكون يعتمد على كليهما.

تنبؤات حول تطور الانفجار الكبير

بحسب نظرية الانفجار الكبير، نشأ الكون في بدايته قبل 13.8 بليون سنة ككتلة نارية ساخنة كثيفة تتألف من عديد من الجسيمات المتفاعلة مع درجة حرارة أعلى من ترليون ترليون درجة. كانت كل الجسيمات المعروفة (وافتراضاً غير المعروفة حتى الآن) تنطلق في كل مكان كيفما اتفق بسرعة تقارب سرعة الضوء، وهي تتفاعل باستمرار، وتتحلل، وتنشأ من الطاقة بحسب نظرية آينشتاين. كان لكل أنواع المادة التي تفاعلت بقوة كافية بعضها مع بعض درجة حرارة مشتركة.

يسمي علماء الفيزياء الغاز الحار والكثيف الذي ملأ الكون في مراحله الأولى بـ *الإشعاع* Radiation. لأهداف كونية، يعرّف الإشعاع بأنه أي شيء يتحرك بسرعات نسبية Relativistic speeds، أي بسرعة الضوء أو نحوها. لكي تُعَدَّ إشعاعاً يجب أن تمتلك العناصر مقداراً كبيراً من الزخْم (كمية الحركة) Momentum بحيث تتجاوز طاقتها الطاقة المخزنة في كتلتها بكثير. كان الكون في بدايته حاراً ونشطاً جدا بحيث إن غاز الجسيمات الأساسية التي ألفته كانت تحقق هذا المعيار بسهولة.

وحدها الجسيمات الأساسية فقط كانت موجودة في الكون -وليس على سبيل المثال الذرات المصنوعة من نوى مقيدة بإلكترونات (أو بروتونات) – والتي كانت مصنوعة من جسيمات أساسية تدعى كواركات Quarks. لا شيء يمكن أن يبقى محبوساً داخل عنصر مقيد في وجه الحرارة والطاقة الشديدة.

مع توسع الكون بردت الجسيمات والإشعاع الذي اجتاح الكون، وخفّ تركيزها. لقد تصرفت مثل هواء ساخن محبوس داخل بالون، فأصبح أبرد وأقل كثافة مع توسع البالون. لأن التأثير التجاذبي لكل عنصر طاقة يؤثر في التوسع بنحوٍ مختلف، أتاحت دراسة توسع الكون الفرصة لعلماء الفلك لتحليل الإضافات المستقلة المساهمة في الإشعاع: المادة، والطاقة المعتمة. توسعت المادة والإشعاع مع توسع الكون ولكن الإشعاع، الذي ينزاح انزياحا أحمر نحو طاقة أقل – مثل صفارة إنذار ينخفض ترددها Frequency مع ابتعادها – يقل تركيزه بسرعة أكثر من المادة. الطاقة المعتمة، في المقابل، لا يقل تركيزها على الإطلاق.

بعد أن برد الكون، حصلت أحداث مهمة عندما لم تعد درجة الحرارة وكثافة الطاقة كافية لإنتاج جسيم معين. حصل هذا عندما لم تعد الطاقة الحركية لجسيم معين تتجاوز mc^2، حيث إن m هي كتلة جسيم معين و c هي سرعة الضوء. الواحدة تلو الأخرى، أصبحت الجسيمات الضخمة أثقل بالنسبة إلى الكون المتبرد.

باندماجها مع الجسيمات المضادة، تمددت هذه الجسيمات الثقيلة، فتحولت إلى طاقة وسخنت عندها الجسيمات الخفيفة المتبقية. ومن ثم انفصلت الجسيمات الثقيلة عندها وتحللت في النهاية.

ولكن حتى مع تغير محتويات الكون، لم يحدث شيء يمكن رصده إلا بعد عدة دقائق من تطور أحداث الانفجار الكبير. لذا سنقفز إلى الوقت الذي تغيرت فيه محتويات الكون تغيرا جوهريا، متغيرا بطرق مختلفة. كان توسع هابل المذكور أعلاه أحد التأكيدات لنظرية الانفجار الكبير. عزز قياسان آخران مهمان – كلاهما يقيس محتويات الكون – ثقة علماء الفيزياء بصحة النظرية. سنتحدث أولاً عن تنبؤ الجزء النسبي لأنواع النوى المختلفة التي تشكلت في بداية الكون، والتي تطابق تقريباً الكثافات المرصودة.

بعد عدة دقائق من "الانفجار الكبير" توقفت البروتونات والنيوترونات من التطاير في عزلة عما سواها. انخفضت درجة الحرارة بقدرٍ كافٍ بحيث أصبحت هذه الجسيمات مقيدة داخل نواة تحبسها بفعل القوى النووية القوية Strong nuclear forces. أيضاً بحلول ذلك الوقت، تفاعلات المادة التي حافظت على عدد البروتونات والنيوترونات متماثلاً في البداية لم تعد فعالة. ولأن النيوترونات يمكنها أن تتحلل إلى بروتونات من خلال القوة النووية الضعيفة Weak nuclear force، فتغير عددها النسبي.

ولأن تحلل النيوترونات يأخذ وقتاً طويلاً نسبياً، صمد جزء جيد من النيوترونات ما يكفي لتمتصه النوى إلى جانب البروتونات الموجودة. تشكلت عندها نوى الهيليوم والديوتيريوم والليثيوم، ونشأت الكمية الكونية من هذه العناصر، إضافة إلى الهيدروجين – الذي نضبت كثافته عندما نشأ الهيليوم. وتحددت الكميات المتبقية من العناصر المختلفة بحسب العدد النسبي للبروتونات والنيوترونات، إضافة إلى السرعة المطلوبة للعمليات الفيزيائية لتحدث في توافق مع سرعة توسع الكون. لذا اختبر تنبؤ التخليق النووي *Nucleosynthesis* (كما تعرف هذه العملية) نظريةَ الفيزياء النووية، إضافة إلى تفاصيل أخرى عن توسع الانفجار الكبير. وجاءت التأكيدات المهمة لنظرية الانفجار الكبير والفيزياء النووية من توافُق المشاهدات الرصدية مع التنبؤات توافقا رائعا.

لم تُثبت هذه القياسات صحة النظريات الموجودة فحسب، بل حالت أيضاً دون نشوء نظريات جديدة. ذلك لأن معدل التوسع -عندما نشأت وفرة النوى- يعود سببه في الغالب إلى الطاقة التي حملتها أنواع المادة التي سبق أن علمنا بها. أي شيء جديد وجد في ذلك الوقت من الأفضل أنه لم يساهم بكثير من الطاقة حينها وإلا لكان معدل التوسع سريعاً جداً. هذا التقييد مهم بالنسبة إلي وإلى زملائي عندما نفكر في مزيد من الأفكار التنبُّئية لما يمكن أن يوجد في الكون. فقط مقادير صغيرة من الأشكال الجديدة للمادة يمكنها أن تكون في توازن ولها نفس درجة حرارة المادة المعروفة في وقت التخليق النووي.

يخبرنا نجاح هذه التنبؤات أيضاً أنه، حتى اليوم، لا يمكن أن يكون مقدار المادة العادية أكثر مما هو مرصود. فالكثير من المادة العادية والتنبؤات حول الفيزياء النووية لن يتوافق مع وفرة العناصر الثقيلة المرصودة في الكون. إضافة إلى القياسات التي شرحتُها في الفصل السابق، والتي تخبرنا بأن المادة الساطعة لا تكفي لتفسير المشاهدات، يشير التنبُّؤ الناجح عن التخليق النووي إلى أن المادة العادية لا يمكن أن تكون السبب لكل المادة المرصودة في الكون – الأمر الذي بدد الأمل بأنها غير مرئية فقط لأنها لم تكن تحترق أو تنعكس بقدرٍ كافٍ. لو كانت هناك مادة عادية أكثر من المادة الساطعة المرصودة، ما كانت لتنطبق تنبؤات الفيزياء النووية الناجحة إلا إذا كان هناك عنصر جديد. ما لم تستطع المادة العادية أن تختبئ بطريقة ما أثناء التخليق النووي، يجب أن نستنتج أن المادة المعتمة موجودة فعلاً.

ولعل أهم مرحلة في تطور الكون، على الأقل من ناحية الاختبار المفصل لتنبؤات علم الكون، حدثت في وقت لاحق – نحو 380,000 سنة بعد الانفجار الكبير. كان الكون في الأصل مملوءاً بالجسيمات المشحونة وغير المشحونة. ولكن في هذا الوقت اللاحق، برد الكون بقدرٍ كافٍ بحيث اندمجت النوى موجبة الشحنة مع

إلكترونات سالبة الشحنة لتشكل ذرة محايدة. منذ ذلك الحين، تألَّف الكون من مادة محايدة، وهي مادة لا تحمل شحنة كهربائية.

بالنسبة *إلى الفوتونات*، الجسيمات التي تنقل القوة الكهرومغناطيسية، كان اقتناص Sequestering الجسيمات المشحونة في شكل نوى هو تغيُّراً جوهرياً. ففي غياب المادة المشحونة التي قد تحرفها، استطاعت الفوتونات اجتياز الكون من دون أي عراقيل. وذلك عنى أن الإشعاع والضوء من الكون الأولي استطاع أن يصل إلينا مباشرة، ومستقلا عن أي تطور معقد إضافي في الكون قد يحدث في وقت لاحق. إن الإشعاع الخلفي الذي نراه اليوم هو إشعاع وُجِد بعد 380,000 سنة من تطور الكون.

هذا الإشعاع هو الإشعاع نفسه الذي كان موجوداً مباشرة بعد أن بدأ الكون في التوسع بعد الانفجار الكبير. ولكن أصبح الآن بدرجة حرارة أقل بكثير. بردت الفوتونات ولكنها لم تختف. تبلغ درجة حرارة الإشعاع اليوم 2.73 كلفن[1]، وهي باردة جداً. إن حرارة الإشعاع أعلى بقليل فقط من درجة صفر كلفن – والمعروف أيضاً بالصفر المطلق، أبرد ما يمكن أن يكون.

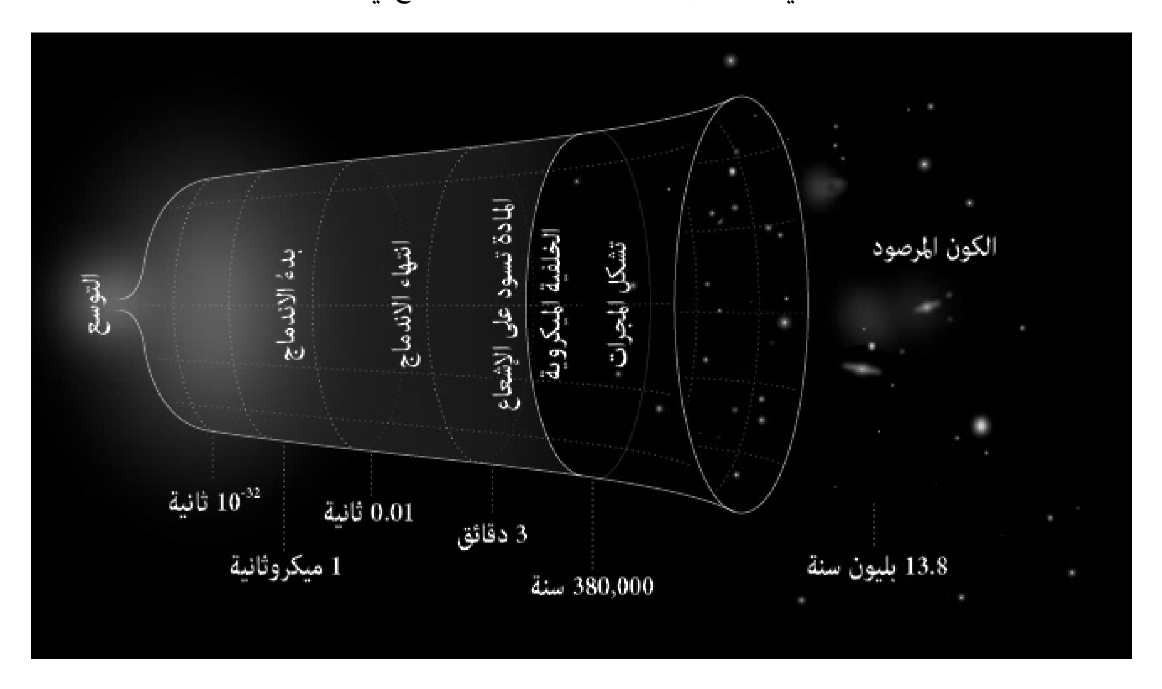
كان اكتشاف هذا الإشعاع هو نوعاً ما "الدليل الدامغ" لنظرية الانفجار الكبير، لعله أكثر الأدلة إقناعاً بأن المعادلات كانت صحيحة. اكتشف عالم الفلك الألماني آرنو بينزياس Arno Penzias والأمريكي روبرت ويلسون Robert Wilson إشعاع الخلفية الميكروية الكونية مصادفة في العام 1963، أثناء استخدامهما التلسكوب في مختبرات بيل Bell Labs في نيوجرسي. لم يكن بينزياس وويلسون يبحثان عن الآثار الكونية. بل كانا مهتمَّين بالهوائيات الإذاعية Radio antennas كطريقة لدراسة الفلك. بالطبع، كانت مختبرات بيل، المرتبطة بشركة هواتف، مهتمة بالموجات الإذاعية أيضاً.

ولكن عندما حاول بينزياس وويلسون معايرة التلسكوب، سجلا ضجيجا منتظما في الخلفية (مثل الضجيج الساكن Static) جاء من جميع الاتجاهات ولم يتغير مع تغير الفصول. ولم يتلاشَ الضجيج قط، لذلك علما أنهما لا يستطيعان إهماله. ولأنه من دون اتجاه مميز، فلا يمكن أن يكون آتياً من مدينة نيويورك القريبة، أو من الشمس، أو من اختبار سلاح نووي في السنة السابقة، بعد تنظيف مخلفات الحَمام المعششة داخل التلسكوب، استنتجا أنها لا يمكن أن تكون آتيةً أيضاً من "المادة البيضاء العازلة كهربيا" من مخلفات الحمام، كما كان يدعوها بينزياس بتهذيب.

أخبرني روبرت ويلسون قصة محالفتهما للحظ وقت اكتشافهما. لم يعلما أي شيء عن الانفجار الكبير، على عكس عالمي الفيزياء النظرية روبرت ديك Robert Dicke وجيم بيبلز Jim Peebles في جامعة برينستون المجاورة. كان عالما الفيزياء في برينستون في خضم تصميم تجربة لقياس الإشعاع المتبقي الذي لاحظا أن له تأثيراً جوهرياً في نظرية الانفجار الكبير عندما اكتشفا أن أحدهم سبقهما إلى ذلك – فقد تحقق الاكتشاف من قبل عالمي مختبر بيل اللذين لم يدركا حتى ذلك الوقت ما اكتشفاه. من حسن حظ بينزياس وويلسون، أن عالم الفلك في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، بيرني بروك Bernie Burke الذي وصفه لي روبرت ويلسون بأنه الإنترنت الأول الشخصي له، كان يعلم عن بحث برينستون وعن الاكتشاف الغامض لبينزياس وويلسون. ربط بروك الأمرين معاً وحسم الترابط من خلال جمع اللاعبين المعنيين بنحوٍ مباشر. بعد استشارة عالم الفيزياء النظرية روبرت ديك Robert Dicke، أدرك بينزياس وويلسون أهمية ما اكتشفاه وقيمته. إضافة إلى اكتشاف توسع هابل السابق، حسم اكتشاف إشعاع الخلفية هذا، الذي حاز به عالما مختبرات بيل جائزةَ نوبل في عام 1978، نظريةَ الانفجار الكبير عن كون متوسع ومتزايد البرودة.

كان هذا مثالاً جميلاً عن العلم أثناء العمل. أُجري البحث من أجل هدف علمي محدد، ولكن كانت له فوائد تقنية وعلمية إضافية. لم يكن عالما الفلك يبحثان عما وجداه، ولكن لأنهما كانا متمرسين علمياً وتقنياً، لم يهملا اكتشافهما. أثمر البحث – أثناء البحث عن اكتشافات صغيرة نسبياً – اكتشافَ تأثيرات عميقة بنحوٍ مذهل، والذي اكتشفاه لأن علماء آخرين كانوا يفكرون في وقت متزامن في الصورة الأكبر. كان اكتشاف علماء مختبرات بيل مصادفة، ولكنه غيَّر الكوزمولوجيا إلى الأبد.

إضافة إلى ذلك، خلال بضعة عقود من اكتشافه، ساعد هذا الإشعاع في تقديم أفكار مهمة جديدة في الكوزمولوجيا. بإنجاز مذهل، ساعدت القياسات المفصلة في هذا الإشعاع على إثبات صحة تنبؤ *التضخم الكوني Cosmological inflation* – الذي بدأت فيه مرحلة انفجارية من التوسع في وقت مبكر.



[الشكل 5] تاريخ الكون في التضخم وتطور الانفجار العظيم، يتضمن تشكل النوى، بدء تشكل البنية، إشعاع الخلفية الميكروية الكونية المدموغ في السماء، والكون المعاصر – الذي نشأت فيه المجرات والعناقيد المجرية.

تضخم الكون

بزغ عديد من التطورات العلمية من الجدال القائم حول ما إذا كان التغيير يحدث تدريجياً، أو فجأة، أو حتى – كما في جهلنا المبدئي بتوسع الكون – إذا كان التغيير يحدث على الإطلاق. على الرغم من أن الناس يهملون عادةً أهمية هذا العامل، فإن أخذ معدل التغيير في عالمنا اليوم بعين الاعتبار مفيد جدا مثلا عند التفكير بعواقب التقنيات، أو عند تقييم التحولات البيئية.

كما دار الجدل حول سرعة التغيير في عديد من نزاعات القرن التاسع عشر المركزية حول نظرية التطور الداروينية أيضاً. كما سنرى في الفصل الحادي عشر، ثار الجدل بين التغير التدريجي في الجيولوجيا -وعرابه تشارلز داروين- الذي تبناه تشارلز ليل Charles Lyell، في مقابل الحجة التي تفضل التغيرات الجيولوجية الفجائية والتي طرحها الفرنسي جورج كوفييه Georges Cuvier. لاحظ كوفييه أيضاً نوعاً آخر من التغير الجذري، فاقترح، جدلياً، أنه لا تنشأ أنواع جديدة فحسب، كما بيّن داروين بنحوٍ ملحوظ، بل تختفي أيضاً بالانقراض.

كان الجدل حول سرعة التغيير محوريا أيضاً في فهمنا لتطور الكون. بخصوص الكون، كانت المفاجأة الأولى أنه يتطور. عندما عُرِضت نظرية الانفجار الكبير أول مرة في بداية القرن العشرين، كانت دلالاتها مختلفة جداً عن دلالات الكون الساكن الذي تفضله الثيولوجيا، والذي تقبله معظم الناس في ذلك الوقت. ولكن مفاجأة أخرى لاحقة كانت الإقرار بأنه في وقت مبكر، خضع الكون الذي نعيشه لمرحلة توسع انفجارية –

التضخم الكوني. كما الحال على الأرض، أدّت العمليات التدريجية والكارثية دوراً في تاريخ الكون. في حالة الكون، "الكارثة" كانت التضخم. وبكلمة كارثة أعني فقط أن هذه المرحلة حصلت فجأة وبسرعة. دمر التضخم محتويات الكون التي كانت موجودة في الأصل، ولكنه أيضاً صنع المادة التي ملأت الكون عندما انتهت مرحلة الانفجار.

التاريخ الذي عرضناه حتى الآن هو عن نظرية الانفجار الكبير النموذجية التي تتحدث عن كون معمَّر متوسع وتنخفض حرارته باستمرار. إنها ناجحة بنحوٍ مذهل، ولكنها ليست القصة الكاملة. حدث التضخم الكوني قبل أن يحل محله تطور الانفجار الكبير النموذجي. على الرغم من أنني لا أستطيع أن أخبرك بما حدث في بداية البداية لنشوء الكون، يسعني القول بيقين معقول إنه في وقت ما في بداية تطوره – ربما بنحو 10^{-36} ثانية – وقع الحدث الباهر الذي يدعى بالتضخم. (انظر: الشكل 5). في أثناء التضخم، توسع الكون بسرعة أكبر بكثير من فترة تطور الانفجار الكبير النموذجي – أُسيّاً Exponentially في الغالب – فاستمر حجم الكون في التضاعف خلال مرحلة التضخم هذه. يعني التوسع الأُسي، على سبيل المثال، أنه عندما كان الكون أقدم بستين ضعفاً من وقت بدء التضخم، تضاعف الكون أكثر من ترليون ترليون مرة، في حين أنه من دون تضخم ما كان ليزداد حجم الكون إلا بمقدار الثُمن.

ما كاد التضخم ينتهي- أيضاً في جزء من الثانية فقط من تطور الكون- حتى خلَّف وراءه كوناً واسعاً مسطحاً متجانساً تنبأت بتطوره اللاحق نظرية الانفجار الكبير التقليدية. كان الانفجار التضخمي نوعاً ما هو "الانفجار" الذي دفع التطور الكوني نحو تطور أبطأ وأكثر استقراراً هو ما وُصِف حالاً. خفف التضخم من المادة الأولية والإشعاع مع التبريد السريع الذي أوصل درجة الحرارة إلى نحو الصفر. ظهرت مجدداً المادة الساخنة فقط بعد انتهاء التضخم وتحولت الطاقة التي كانت تدفع التضخم إلى عدد هائل من الجسيمات الأولية. ساد هذا التوسع المألوف والبطيء بعد انتهاء التضخم. منذ هذه المرحلة وما بعد، تنطبق نظرية الانفجار الكبير القديمة.

طور عالم الفيزياء آلان غوث Alan Guth نظرية حول التضخم لأن نظرية الانفجار الكبير – بقدر نجاحها – تركت عدة مسائل من دون حل. إذا نشأ الكون من مكان متناهٍ في الصغر، فَلِمَ هناك كثير من الأشياء المحتواة فيه؟ وما سبب العمر الطويل للكون؟ بالاستناد إلى نظرية الجاذبية، قد تتوقع أن كوناً يحتوي كثيراً من الأشياء سيتوسع إلى العدم أو سينهار بسرعة. مع ذلك، على الرغم من الكم الهائل من المادة والطاقة التي يحتويها، كانت أبعاد الكون المساحية اللامتناهية الثلاثة مسطحة تقريباً وكان تطور الكون بطيئاً بما يكفي لكي نحتفل بذكرى وجوده بعد 13.8 بليون سنة.

ونظرية الانفجار الكبير الأصلي تغفل عن أمر آخر، ألا وهو تفسير سبب تجانس الكون. عندما شع الإشعاع الكوني الذي نلاحظه الآن، كان الكون بحجم واحد على ألف من حجمه الحالي، أي كان من الممكن للمسافة التي قطعها الضوء أن تكون أصغر بكثير. مع ذلك عندما درس المراقبون الإشعاع الصادر من مناطق مختلفة في السماء في ذلك الوقت. بدا الإشعاع متطابقاً، ما يعني أن الانحرافات في درجة الحرارة والكثافة ضئيلة جداً. هذا الأمر مُربك لأنه بحسب سيناريو الانفجار الكبير الأصلي، كان عمر الكون في وقت انفصال الإشعاع الكوني عن المادة المشحونة أصغر بكثير من أن يوفر الوقت الكافي للانتقال ولو 1 في المئة من المسافة في السماء. بمعنى آخر، إذا عدت بالوقت إلى الوراء وسألت ما إذا كان الإشعاع الموجود في هذه البقاع المنفصلة من السماء يمكنه أن يرسل أو يستقبل أي إشارات فيما بينها، فستكون الإجابة بالنفي. ولكن إذا لم تتواصل المناطق المنفصلة بعضها مع بعض، فلِمَ تبدو متشابهة؟ كما لو أنك مع ألف غريب من أماكن مختلفة وتلبسون ملابس من متاجر متأثرين بمجلات أزياء مختلفة دخلتم مسرحاً وترتدون الملابس نفسها. إذا لم يكن بينك وبينهم أي تواصل أو منافذ إعلامية مشتركة، فستكون مصادفة لافتة أن تتطابقوا جميعكم في اللباس. انتظام السماء أكثر إذهالاً لأن الانتظام ينطبق بدقة 10000/1. ويبدو أن الكون قد بدأ من أكثر من 100,000 منطقة لم تتواصل بعضها مع بعض.

بدت الفكرة التي اقترحها غوث في العام 1980 مثيرة جداً في ظل أوجه القصور هذه. فقد اقترح حقبة مبكرة توسع فيها الكون بسرعة استثنائية. بينما في سيناريو الانفجار الكبير النموذجي، ازداد حجم الكون بهدوء وبثبات، في حقبة التضخم، خضع الكون لمرحلة من التوسع الانفجاري. بحسب نظرية التضخم الكوني، نما الكون البدائي من منطقة صغيرة جداً إلى منطقة أكبر تصاعدياً وفي فترة زمنية قصيرة جداً. وازداد حجم المنطقة التي يمكن لشعاع ضوئي أن يجتازها بمقدار عامل من ترليون ترليون. بالاعتماد على وقت بدء التضخم ومدته، قد تكون المنطقة التي يجتازها شعاع ضوئي تبدأ من 10^{-29} متر بالحجم ولكن توسعت خلال التضخم لتصبح على الأقل بحجم 1 ميليمتر – أكبر بقليل من حبة رمل. مع التضخم، لديك نوعا ما كونٌ كامل في حبة رمل – أو على الأقل بحجم حبة رمل، كما يود ويليام بليك William Blake أن يعتقد، إذا قست حجم الكون على أنه المنطقة المرصودة في ذلك الوقت.

يفسر تضخم الكون فائق السرعة ضخامة الكون وانسجامه وتسطحه. الكون ضخم لأنه نما نمواً أسيّاً – في وقت قصير جداً أصبح كبيراً جداً. يغطي الكون المتوسع توسعاً أسيّاً مناطق أكبر بكثير من معدل سيناريو الانفجار الكبير النموذجي الأبطأ. الكون منتظم ومتجانس لأن التوسع الهائل خلال التضخم صقل التجاعيد في بنية الزمكان، مثلما يزيل مد أكمام معطفك الطيات في قماشه. في الكون المتضخم نمت منطقة صغيرة جداً يمكن أن يكون كل شيء فيها قريباً بما يكفي للتواصل عن طريق الإشعاع إلى الكون الذي نراه اليوم.

يفسر التضخم التسطح أيضاً. من وجهة نظر ديناميكية، يعني تسطح الكون أن الكثافة في الكون بمجمله هي في الحدود حيث يمكن أن تبقى وقتاً طويلاً جداً. إن كثافة طاقة أكبر من هذه ستصنع تقوساً في الفضاء – مثل التقوس الذي تجده في كرة – مما سيجعل الكون ينهار بسرعة. وأي كثافة أقل كانت ستجعل الكون يتوسع بسرعة لا تسمح للبنية بأن تتشكل وتتوحد. تقنياً، أنا أبالغ قليلاً. بقدر قليل من التقوس، يمكن للكون أن يستمر بالمدة الزمنية نفسها. ولكن ذلك التقوس سيكون صغيراً بنحو غامض من دون التضخم ليبرر قيمته.

في سيناريو تضخم، الكون حالياً ضخم ومسطح لأنه نما منذ فترة مبكرة. تخيل لو أنك نفخت بالوناً ليكون بالحجم الذي تريده. إذا ركزت على بعض المناطق المعينة في البالون، ستجد أنها أصبحت أكثر تسطُّحاً مع ازدياد حجم البالون. على نحو مشابه، فكر الناس أن الأرض مسطحة لأنهم رأوا رقعة صغيرة فقط من سطح الكرة الأكبر بكثير. الأمر نفسه ينطبق على الكون. تسطح مع توسعه. الفرق أنه توسع بمعامل يتجاوز ترليون ترليون.

كان تسطح الكون البالغ تأكيداً رئيساً للتضخم. قد لا يأتي هذا كمفاجأة، ما دام التسطح كان في النهاية إحدى المشكلات التي يعالجها التضخم. ولكن في وقت إدراك فكرة التضخم، كان من المعروف أن الكون كان أكثر تسطحاً مما تقترحه التوقعات البسيطة، ولكن لا شيء يقارب الدقة المطلوبة لاختبار تنبُّؤ التضخم البالغ. قِيسَ الكون الآن ليكون مسطحاً بمستوى 1 في المئة. إن لم يكن هذا صحيحاً، لاستُبعِدت فكرة التضخم.

عندما كنت طالبة دراسات عليا في ثمانينات القرن العشرين، كان التضخم فكرة مثيرة للاهتمام، ولكن ليس فكرة يأخذها علماء فيزياء الجسيمات على محمل الجد. من وجهة نظر فيزياء الجسيمات، بدت الظروف المطلوبة لتوسع أسي طويل الأمد غيرَ مرجحة بقدرٍ كبير. في الواقع لا تزال كذلك. كان من المفترض أن يعالج التضخم بساطة الظروف الأولية لتوسع الكون. مسألة كيفية حدوث التضخم – ونموذج الفيزياء المضمن فيها – تبقى مسألة تنبؤات. فمواضيع بناء النموذج الذي أجهدنا منذ ثمانينات القرن العشرين لا يزال مشكلة. من ناحية أخرى، فكر أشخاص مثل آندري ليندي Andrei Linde، عالم فيزياء روسي المولد يعمل في ستانفورد الآن، والذي كان أول من عمل على موضوع التضخم، بأنه لا بد أن يكون صحيحاً حتى عند اقتراح الفكرة أول مرة ذلك ببساطة لأن أحداً لم يجد أي حل آخر للغز الحجم، والتسطح والتجانس، التي كان التضخم قادراً على حلها بضربة واحدة.

في ضوء القياسات المفصلة الحديثة حول إشعاع الخلفية الميكروية الكونية، يوافق معظم علماء الفيزياء اليوم على الفكرة. على الرغم من حقيقة أن علينا حتى الآن أن نحدد الدعامات النظرية للتضخم، وأن التضخم حدث منذ فترة طويلة، إلا أنه يقودنا إلى تنبؤات قابلة للاختبار، والتي أقنعت معظمنا بأن التضخم، أو شيئاً يشبه التضخم كثيراً، قد حدث. أكثر هذه المشاهدات دقة والتي تتعلق بتفاصيل حول درجة إشعاع الخلفية 2.73 الذي اكتشفه بينزياس وويلسون. قاس مسبار الخلفية الكونية كوبي Cosmic Background Explorer (اختصارا: المسبار COBE) التابع لناسا هذا الإشعاع، ولكن بنحوٍ أكثر شمولاً وضمن نطاق واسع من الترددات – مبرهناً على درجةٍ عالية جداً من التجانس في السماء.

ولكن أكثر اكتشافات المسبار COBE إثارة للدهشة – الذي انتصر على كل مشككي التضخم – هو أن الكون الأولي لم يكن متجانساً تماماً. بوجهٍ عام، جعل التضخم الكون متجانساً بنحوٍ بالغ. ولكن التضخم أيضاً أظهر قدرا ضئيلاً من اللاتجانس Inhomogeneities – انحرافات عن التجانس التام. تخبرنا ميكانيكا الكم أن الوقت الدقيق لانتهاء مرحلة التضخم غير مؤكَّد، ما يعني أنه انتهى في أوقات متفاوتة بعض الشيء في أماكن مختلفة في السماء. دُمغت هذه التأثيرات الكمية الضئيلة في الإشعاع كانحرافات صغيرة عن التجانس التام. وإن كانت أصغر بكثير، إلا أنها تشبه الاضطرابات التي تظهر على صفحة الماء عندما ترمي حصاة في البحيرة.

من بين الاكتشافات المدهشة في العقود الماضية، اكتشف المسبار COBE مقدار التذبذب الذي تولد عندما كان الكون بحجم حبة رمل تقريباً، والتي كانت في النهاية أصل وجودك، ووجودي، ووجود المجرات وكل تركيبة الكون. تولدت أشكال انعدام التجانس الكونية الأولية بتزامن مع انتهاء التضخم. وقد بدأت على مقياس ضئيل الطول ولكنها توسعت مع توسع الكون إلى أحجام يمكنها أن تنشئ مجرات وبنى أخرى قابلة للقياس، كما سيشرح الفصل التالي.

بمجرد اكتشاف هذه الاضطرابات في الكثافة – كما كانت تعرف هذه الانحرافات في درجة الحرارة وكثافة المادة، أصبحت المسألة مجرد مسألة وقت قبل أن تُدرَس بالتفصيل. بدايةً في عام 2001، قاس مسبار ويلكينسون لقياس التباين الميكروي Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (اختصارا: المسبار WMAP) اضطرابات الكثافة بدقة أكثر وعلى مقاييس زاويّة Angular scales أصغر. لاحظ المسبار، إلى جانب مراصد في القطب الجنوبي، التموج – الاضطرابات – في كثافة الإشعاع الذي أحاط بالتعقيد الذي بدأ بالنشوء. أكدت تفاصيل القياسات تسطُّح الكون، وحددت الكمية الإجمالية للمادة المعتمة، وأثبتت صحة التنبؤات حول التوسع الأسي المبكر. في الواقع، إحدى أكثر نتائج المسبار WMAP روعة هي التأكيد التجريبي للنموذج التضخمي.

أطلقت الوكالة الأوروبية لأبحاث الفضاء قمرها الاصطناعي – مهمة بلانك Planck mission – في مايو العام 2009 لدراسة الاضطرابات بتفاصيل أكثر إتقاناً. وفعلاً حسنت نتائج القمر الاصطناعي من دقة معظم الكميات الكونية المعروفة وساعدت في تعزيز معرفتنا عن الكون الأولي. من أهم إنجازات القمر الاصطناعي بلانك أنه حصر كمية إضافية أخرى تُشير إلى الديناميكيات التي قادت التوسع التضخمي. ما دام الكون متجانساً في معظمه، مع اضطرابات طفيفة تخترق تجانسه، فإن اتساع الاضطرابات في السماء هو في الغالب مستقل عن حدها المساحي، ولكنه يكشف اعتماداً صغيراً على المقياس. يعكس الاعتماد على المقياس كثافة الطاقة المتغيرة في الكون في فترة انتهاء حقبة التضخم. بتأكيد لافت لديناميكيات التضخم، قاس المسبار WMAP والمركبة الفضائية بلانك الأكثر دقة الاعتماد على المقياس، وحدد أنه في مرحلة مبكرة من التوسع السريع وصلت إلى نهايتها تدريجياً، وقاس قيمة تقيد ديناميكيات التضخم.

على الرغم من أن فهمنا لا يزال بعيداً عن الكمال، برهنت الكوزمولوجيا اليوم على أن التضخم وتوسع الانفجار الكبير التالي هما جزء من تاريخ كوننا. يمكننا أن نبرهن على هذه النظريات بتفصيل لأن الكون الأولي، بنسبته العالية من التجانس، سهل الدراسة نسبياً. ويمكن حل المعادلات وتقييم البيانات بسهولة.

لكن، منذ بلايين السنين عندما حدث تشكُّل البنية، تغير الكون من النظام البسيط نسبياً إلى كون معقد أكثر، لذلك تواجه الكوزمولوجيا تحديات أعظم عندما تعالج التطور اللاحق للكون. أصبح التكهن والتفسير لتوزُّع محتويات الكون أصعب مع تشكل بنى مثل النجوم، والمجرات، والعناقيد المجرية.

مع ذلك، هناك كثير من المعلومات الدفينة في هذه البنية المستمرة في التطور - التي ستكشفها المشاهدات والنماذج وقوة الحاسوب في نهاية المطاف. كما سنرى في القسم التالي من الكتاب، يعدنا قياس هذه البنية والتنبؤ بها بتعليمنا الكثير - بما في ذلك علاقة المادة المعتمة بالعالم. ولكن في الوقت الحالي، فلنستكشفْ كيف تشكلت هذه البنية في ا لمقام الأول.

هل تتذكر حـديثي على العشاء في ميونخ عندما اعترض ماسيمو، الخبير بالعلامات التجارية، على اسم "المادة المعتمة". في الـعشاء نفسه تساءل مات، مشارك آخر في المؤتمـر عـرفني عليه مـاسيمو، عن إمكانات الناس في تـسخير قوة هذه المادة المراوغة. كان من المنطقي أن يصدر سؤال مثل هذا عن مصمم ألعاب. وبعد مدة قـصيرة، سألتني كاتبة سينمائية السؤال نفسه– مـجدداً، ليس مفاجئاً، في ضوء ميلها إلى كـتابة الخيال العلمي.

ولكن هذا التساؤل يمثل تفكيراً تواقاً، والذي أعزوه من جديد إلى الاختيار البائس للمصطلح. المادة المعتمة ليست نذير شؤم– ولا مصدر سخاء– لقوة استراتيجية في محيطنا المحلي. نظراً إلى ضعف تأثير المادة العادية في المادة المعتمة ضعفا شديدا، لا يمكن لأحد أن يخزنها في قبو أو مرآب. لأن أيدينا وأدواتنا مصنوعة من المادة العادية، لا يمكننا أن نصنع صواريخ من المادة المعتمة، ولا يمكننا أن نصنع فخاخاً من المادة المعتمة. العثور على المادة المعتمة صعب بما يكفي. أما تسخيرها فهو أمر مختلف تماماً. حتى إن تمكنا من إيجاد طريقة لاحتواء المادة المعتمة، لن تؤثر فينا بأي طريقة تذكر لأنها تتفاعل فقط من خلال الجاذبية أو قوى أضعف من أن نكتشفها بعد– حتى باستخدام أبحاث عالية الحساسية. في غياب عناصر فلكية ضخمة، يصبح تأثير المادة المعتمة أصغر من أن يستحق الاهتمام. ولهذا السبب أيضاً يصعب إيجادها.

ولكن الكمية الكبيرة من المادة المعتمة التي خزنها الكون بمجمله هو مبحث آخر. انهارت الكمية الهائلة للمادة المعتمة التي انتشرت في أرجاء الكون وتجمعت لتصنع عناقيد مجرية ومجرات، التي بدورها سمحت بتشكيل النجوم. وعلى الرغم من أن المادة المعتمة لم تؤثر بنحوٍ مباشر في الناس أو التجارب المخبرية (بعد) بأي طريقة لافتة للنظر، فإن تأثيرها التجاذبي كان جوهريا في تشكيل بنية الكون. وبسبب الكميات الهائلة المتركزة في هذه المناطق المنهارة حيث توجَد المادة، بقيت المادة المعتمة تؤثر في حركة النجوم وفي مسارات المجرات اليوم.

كما سنرى قريباً، من الممكن لنوع مألوف بقدرٍ أقل من المادة المعتمة التي انهارت لتصبح أكثر كثافة أن يؤثر في مسار المجموعة الشمسية أيضاً. لذلك حتى إن لم يستطع الناس تسخير قوة المادة المعتمة، الكون الأكثر نفوذاً يمكنه ذلك. سيشرح هذا الفصل دور المادة المعتمة الجوهري في تطور الكون، وفي تشكل المجرات في أثناء عمرها المعروف والمحدد.

البيضة والدجاجة

تخبرنا نظرية تشكل البنية Theory of structure formation كيف تطورت المجرات والنجوم من السماء المتجانسة المضجرة بنحوٍ بليغ– ولكن ليس تماماً– والتي كانت الإرث الأخير من التضخم. هذه الصورة المتجانسة لتشكل البنية، ككثيرٍ من الصور المقدمة في هذا الكتاب، هي تقدُّم حديث نسبياً. ولكن ترسخت هذه النظرية الآن بفضل تطورات الكوزمولوجيا، مثل نظرية الانفجار الكبير المزودة بالتضخم، وبالمكونات المقيسة بنحوٍ أفضل مثل المادة المعتمة. تدعنا هذه الدعائم نفسر كيف تطورت المنطقة الساخنة، المضطربة، غير المتمايزة التي ألفت الكون الأولي إلى المجرات والنجوم التي نراها اليوم.

أولاً كان الكون ساخناً ومتراصاً ومتجانساً في معظمه– هو نفسه في كل نقطة في الفضاء. وكان متناظراً أيضاً– أي أنه نفسه في كل الاتجاهات. تفاعلت الجسيمات، وظهرت، واختفت، ولكن كثافة وسلوك الجسيمات كان نفسه في كل مكان. هذه بالطبع صورة مختلفة تماماً عن الصورة التي تراها عندما تبحث عن صور للكون، أو ببساطة عندما ترفع نظرك إلى السماء لتتأمل جمال سماء المساء.

لم يعد الكون متجانساً. فقد كانت النجوم والمجرات والعناقيد المجرية تُرقِّط أرجاء الكون، باسطة توزيعها غير المتساوي في علياء السماء. هذه البنى هي في صميم كل شيء في عالمنا، الذي ما كان ليوجد لولا الأنظمة النجمية المتراصة التي كانت أساسية في تشكيل العناصر الثقيلة وكل الأشياء المذهلة، بما فيها الحياة، التي تكونت في واحد على الأقل من البيئات النجمية المركزة.

تكمن البنية المرئية للكون في الغاز وفي الأنظمة النجمية. تأتي هذه المجموعات من النجوم بتشكيلة واسعة من الأحجام والأشكال المختلفة. تتألف *النجوم الثنائية* ***Double stars***، التي يدور كل من نجميها حول الآخر، من نظام نجمي، وكذلك المجرات، التي تختلف في أحجامها ما بين مئة ألف نجم وترليون نجم. والعناقيد المجرية التي تتكون من ألف ضعف هذا العدد هي أنظمة نجمية أيضاً.

لتقدير أنواع الأجرام، دعنا نفكر في الكتل والأحجام النمطية للأجرام التي يحتويها كوننا. تقاس الأحجام الفلكية عادة بالفرسخ الفلكي أو بالسنين الضوئية، في حين تقاس الكتل الفلكية بالكتل الشمسية Solar masses– عدد الشموس التي تعطينا الكتلة المكافئة. تتفاوت المجرات من حيث الحجم مما هو أصغر من المجرات القزمة التي تقارب كتلتها نحو 10 بلايين كتلة شمسية إلى أكبر المجرات التي تصل كتلتها إلى نحو 100 ترليون كتلة شمسية. تتمتع درب التبانة بحجم أصغر وأكثر نمطية بنحو ترليون كتلة شمسية– تمثل هذه القيمة كتلتها الإجمالية، بما فيها عنصر المادة المعتمة السائد أكثر. يتراوح قطر معظم المجرات بين بضعة آلاف ومئات آلاف السنين الضوئية. بينما تحتوي العناقيد المجرية، في المقابل، على ما يراوح بين 100 ترليون و1,000 ترليون كتلة شمسية، بقطر نمطي يتراوح بين 5 و50 مليون سنة ضوئية. يحتوي العنقود المجري على نحو ألف مجرة، بينما تحتوي العناقيد المجرية الهائلة على 10 أضعاف هذا العدد.

لكن، على الرغم من وجود هذه الأجرام اليوم، فهي لم تكن موجودة في الكون الأولي. كان الكون الأولي كثيفا جدا، لذلك لم يكن يحتوي بعد على النجوم أو المجرات ذات الكثافات الأقل بكثير. تشكلت الأنظمة النجمية فقط بعد أن برد الكون إلى درجة حرارة أصبح معدل كثافته فيها أقل من كثافة الأجرام التي تشكلت أخيراً. كان على تشكل البنية أن ينتظر أيضاً إلى أن حملت المادة في الكون طاقة أكثر من التي حملها الإشعاع. لاحظ أنني أستخدم التعريف الكوني للإشعاع، والذي هو أي شيء، بما في ذلك الجسيمات كالبروتون الذي يسافر بسرعة الضوء وأقل بقليل. في الكون الساخن الأولي، كل شيء تقريباً طابق هذا المعيار لأن درجة الحرارة كانت عالية جداً، مما سمح للإشعاع بأن يسيطر على طاقة الكون.

مع توسع الكون، قلت كثافة الإشعاع والمادة، وكذلك كثافة الطاقة فيهما. ولأن الطاقة في الإشعاع، التي تنزاح انزياحاً أحمر نحو طاقة أقل، تضمحل بسرعة أكبر، فقد سيطرت المادة– بعد انتظار 100,000 سنة ليأتي دورها تحت الضوء– على طاقة الكون. في هذه الحقبة الحاسمة، حلت المادة محل الإشعاع كالمساهم الأبرز في طاقة الكون.

وهذه نقطة جيدة للبدء بتتبع كيفية نمو البنية لأول مرة، 100,000 سنة بعد تطور الكون، عندما بدأت المادة السيطرةَ. هذه الحقبة متأخرة نسبياً مقارنة بوقت ظهور الاضطرابات لأول مرة، ولكنها لم تكن متأخرة جداً عن المرحلة التي وسمت انتشار إشعاع الخلفية الذي نرصده. كانت سيطرة المادة مهمة للكون لأن المادة المتحركة ببطء تحمل ضغطاً أقل بكثير من الإشعاع، ومن ثم تؤثر في توسع الكون بشكل مختلف. عندما سادت المادة، تغير معدل توسع الكون. ولكن الأهم من ذلك بالنسبة إلى تشكل البنى، استطاعت بنى صغيرة ومضغوطة عندها أن تبدأ النمو. أما الإشعاع، الذي يسافر بسرعة الضوء أو أقل بقليل، فلا يتباطأ بما يكفي لينحبس في أنظمة صغيرة مقيدة بالجاذبية. يمحو الإشعاع الاضطرابات، مثلما تزيل الريح موجات الرمال

المطبوعة على الشاطئ. في المقابل، يمكن للمادة أن تتباطأ وتتكتل. فقط المادة المتحركة ببطء تنهار بما يكفي لتشكل بنية. ولهذا السبب يقول علماء الكون أحياناً إن *المادة المعتمة باردة Cold dark matter*، ما يعني أنها ليست ساخنة ونسبية ولا تتصرف كالإشعاع.

بعد أن سيطرت المادة على كثافة الطاقة في الكون، ساهمت اضطرابات الكثافة- مناطق أقل أو أكثر كثافة من غيرها، والتي تشكلت عندما انتهى التضخم- بتسريع انهيار المادة التي غرست بذرة نمو البنية. نتيجة لذلك نمت الاضطرابات وحولت الكون المتجانس في بدايته إلى ما سيتضخم في النهاية إلى مناطق متمايزة في السماء. كانت الانحرافات الضئيلة في الكثافة على مستوى أقل من 1 في كل 10,000 كافية لخلق بنية من كون شبه متجانس لأنه مسطح، ما يعني أن لديه كثافة الطاقة الضرورية التي توسع الحدود بين الانهيار السريع وبين التوسع السريع. تولد الكثافة الضرورية ما هو مطلوب ليتوسع الكون ببطء ويبقى لمدة طويلة بما يكفي لتتشكل البنية. في هذه البيئة المحددة تحديدا دقيقا، حتى أصغر اضطرابات الكثافة كفيلة بأن تسبب انهيار مناطق من المادة، وبذلك تبدأ بتشكيل البنية.

ومع بداية هذا الانهيار لتشكل البنية ساهمت قوتان متنافستان في حدوث ذلك. شدت الجاذبية المادة إلى الداخل، بينما دفعها الإشعاع- وإن لم يكن نوعاً مسيطراً من الطاقة- إلى الخارج. تعرف العتبة التي سيتدمر وراءها هذا التوازن بـ*كتلة جينس Jeans mass*. ينهار الغاز داخل المنطقة التي لا يتوازن فيها ضغط الإشعاع الخارجي مع الشد التجاذبي الداخلي، وتصبح المادة والعناصر التي نمت من قوتها الجاذبة هي بذرة المجرات الساطعة والتشكيلات النجمية.

بذلت المناطق ذات الكثافة الأعلى شداً جذبياً Gravitational attraction أقوى من تلك في المناطق الأقل كثافة، مما خلق مناطق تزايد كثافتها بقدرٍ متزايد وتستنزف المناطق المحيطة التي هي أصلا آخذة في التخلخل. ازداد تكتل الكون فتزايد غنى المناطق الغنية (بالمادة) وازداد افتقار المناطق الفقيرة (في المادة). استمر تجمع المادة- لصنع أجرام مقيدة بالجاذبية- واستمرت المادة في الانهيار من خلال عملية تغذية رجعية إيجابية Positive feedback. وتولّدت النجوم والمجرات والعناقيد المجرية في هذا الوقت بفعل تأثير الجاذبية على تذبذبات ميكانيكا الكمّ Quantum mechanical fluctuations الصغيرة الأولية التي تولد عند نهاية التضخم.

بسبب مناعتها ضد الإشعاع وبسبب وفرتها الأكثر، كانت معظم المادة التي خلقت نقاط الجذب التي شدت المادة لتنهار بشكل أولي هي مادة معتمة- وليس المادة العادية. على الرغم من أننا نرى النجوم والمجرات بسبب الضوء المنبعث منها، إلا أن المادة المعتمة هي ما جذب المادة المرئية أولاً إلى هذه المناطق الأكثر كثافة، حيث تمكنت المجرات والنجوم من ثم من النشوء. عندما انهارت منطقة كبيرة بما يكفي، شكلت المادة المعتمة هالة شبه كروية يمكن لغاز المادة العادية أن يبرد داخلها، ويتكثف في المركز، ويتقسم في النهاية إلى نجوم.

وهكذا بوجود المادة المعتمة، انهارت مناطق بسرعة أكبر مما يمكن بوجود المادة العادية وحدها، لأن الكثافة الإجمالية الأكبر لطاقة المادة سمحت للمادة بالهيمنة على الإشعاع بنحوٍ أسرع. ولكن المادة المعتمة كانت مهمة أيضاً لأن الإشعاع الكهرومغناطيسي منع في البداية المادة العادية من تطوير بنى أصغر من مائة ضعف حجم مجرة. فقط بالتعلق بالمادة المعتمة كان للأجرام بحجم المجرات وبذور النجوم في كوننا الوقتُ الكافي لتتشكل. لولا أن ابتدأت المادة المعتمة الانهيار، لما وصلت النجوم إلى عددها وتوزيعها الحالي.

لذا فإن المادة المعتمة هي التي ابتدأت الانهيار إلى بنية. ليس فقط لأن هناك وفرة منها، ولكن لأن المادة المعتمة محصنة بنحوٍ أساسي من تأثير الضوء، لم يستطع الإشعاع الكهرومغناطيسي تشتيتَها كما يمكنه أن يفعل بالمادة العادية. بذلك أنشأت المادة المعتمة التذبذبات في توزع المادة والتي استجابت له المادة العادية عندما انفصل Decoupled الإشعاع عنها. منحت المادةُ المعتمة المادةَ العادية دفعة البداية- ممهدة الطريق

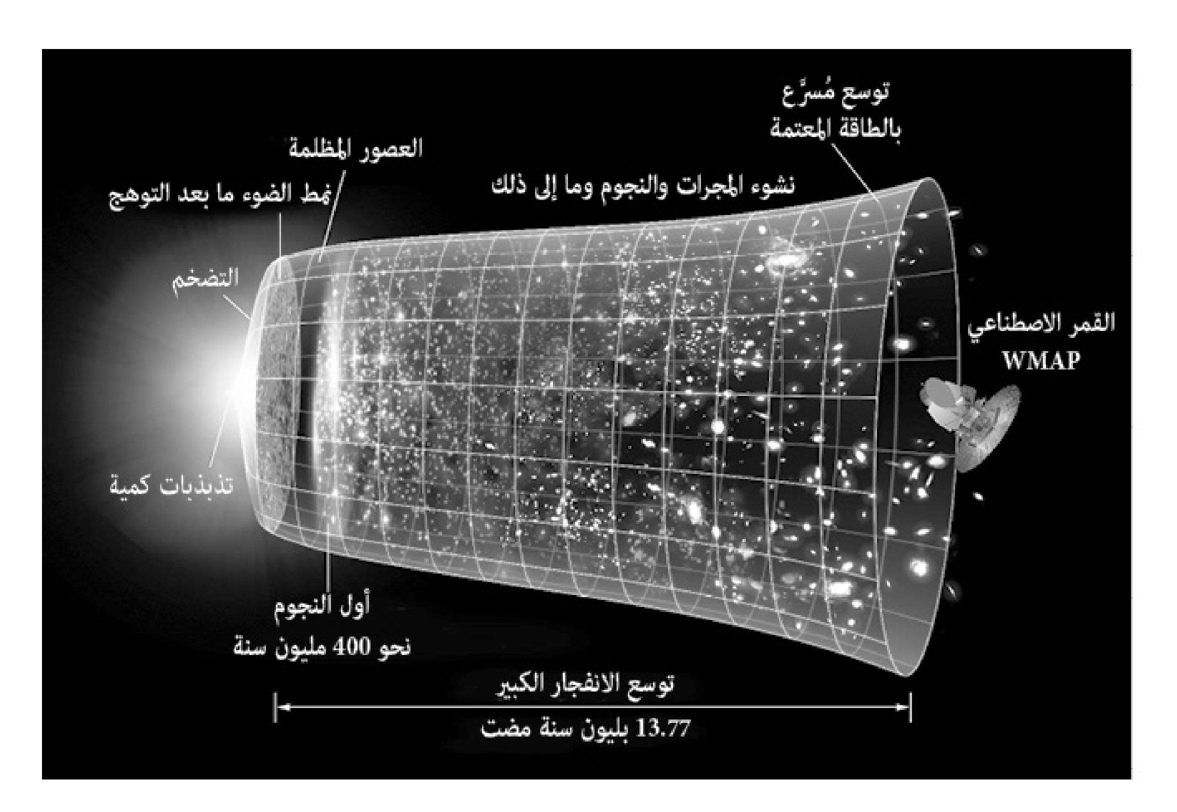
لتشكيل المجرات والأنظمة النجمية. لأنها محصنة ضد الإشعاع، يمكنها أن تنهار حتى عندما لا تستطيع المادة العادية كذلك، مُشكِّلة أساساً يُمكِّن البروتونات والإلكترونات من الانقياد إلى المناطق المنهارة.

هذا الانهيار المتزامن للمادة المعتمة والمادة العادية إلى أجرام مرئية مثل المجرات والنجوم مهم لتشكل البنية، وأيضاً للرصد. على الرغم من أننا نرى المادة العادية بنحوٍ مباشر، يمكننا أن نكون على يقين من أن المادة المعتمة والمادة العادية موجودتان في المجرات نفسها. بما أن المادة العادية اعتمدت على المادة المعتمة لحرث بذرة البنية- المادة العادية، التي انضمت إلى الركب، تقبع في الغالب في بنى تحتوي على كميات وفيرة من المادة المعتمة أيضاً. لذا، نوعاً ما، فإن البحث عن المادة المعتمة تحت ضوء المصباح ليس مناسباً.

تجدر الإشارة أيضاً إلى أن المادة المعتمة لا تزال تؤدي دوراً مهما اليوم. لا تساهم فقط في الشد التجاذبي الذي يحفظ النجوم من التطاير مبتعدة عن بعدها، ولكنها تعيد جذب بعض المادة التي قذفتها السوبرنوفات (المستعرات العظمى) Supernovae إلى المجرات. تساعد المادة المعتمة بذلك على استبقاء العناصر الثقيلة، التي هي ضرورية لتشكُّل مزيدٍ من النجوم وفي النهاية للحياة بحد ذاتها.

لكن، على الرغم من قدرة علماء الفيزياء على التنبؤ بتشكل البنية المبكر بالاعتماد على النظرية، لا يستطيع أي مراقب أن يشاهد بالتفصيل تحول الكون في أثناء تشكل البنية الأولي. تلتقط التلسكوبات الضوء المرسل في أوقات حديثة، وأيضاً تتركنا نتفحص المجرات الأولى التي تشكلت منذ بلايين السنين. في المقابل، يصلنا إشعاع الخلفية الميكروية الكونية من وقت كان فيه الكون ممتلئاً بالإشعاع- ولكن عندما انهار ما زالت هناك أجرام مقيدة بالجاذبية عليها أن تتشكل. حَفِظ إشعاع الخلفية نمط تذبذبات الكثافة الأولية للسنوات 380,000 سنة التالية من تطور الكون، ولكن لم تنشأ نجوم ومجرات تبعث ضوءاً قابلاً للرؤية إلا بعد نصف بليون سنة.

كانت الفترة المتوسطة بعد إعادة التركيب- عندما تشكلت الذرات المحايدة وطُبع النمط في الإشعاع الكوني الميكروي- وقبل أن تنشأ الأجرام المضيئة حقبة غامضة لا يمكن دراستها بأدوات الرصد الحالية. لا يمكن للأجرام أن ترسل الضوء لأن النجوم لم تكن قد تشكلت بعد، ومع ذلك فإن إشعاع الخلفية الميكروية الذي تفاعل قبلاً مع المادة المشحونة كهربائياً المنتشرة في كل مكان لم يعد ينير السماء. هذه الحقبة غير مرئية للتلسكوبات التقليدية (انظر: الشكل 6). ومع ذلك فإنه في هذه الحقبة تحديداً تحول الحساء البدائي Primordial soup إلى البنى السلف للكون المعقد والغني الذي نراه اليوم.



[الشكل 6] بعد الفترة التي نرصدها من خلال إشعاع الخلفية الكونية الميكروي، تدخل حقبة مظلمة تتشكل فيها البنى، يليها ظهور (وتبدُّد) النجوم الأولى، وتشكُّل المجرات والبنى الأخرى اللاحقة لذلك، وهيمنة الطاقة المعتمة على توسع الكون. (ناسا)

يقارن آفي لويب Avi Loeb، عالم الفيزياء الفلكية من هارفارد، عدم قدرتنا على مشاهدة تشكل النجوم الأولى بواسطة التقنيات الحالية بعدم قدرتنا على مشاهدة تشكل دجاجة من بيضة. فالبيضة تحتوي على بنية لزجة تشبه الحساء. ولكن إذا تركت دجاجة تجلس عليها مدةً كافية فسيخرج من تلك البيضة كتكوت كامل الوظائف، وهو سيستمر في النمو ليصبح دجاجة مكتملة النمو. لا يشبه البياض والمح اللذان نعرفهما من البيضة المكسورة أي شيء كالكتكوت الذي يخرج منها، ولكنها تحتوي على كل مكونات الكتكوت الذي سيتكون. غيرَ أن التحول يحدث داخل قشرة البيضة، لذلك لا يمكن لأحد أن يرى ما يحدث في الداخل من دون أدوات خاصة.

على نحو مماثل، سنحتاج إلى تقنيات جديدة لنشهد التشكل الأول للبنية. لا أحد اليوم يستطيع أن يرى الحقبة الغامضة في تطور الكون- مع أن الاقتراحات قيد العمل. مع ذلك نحن نعلم أن اضطرابات الكثافة، كالبيضة، تحتوي على مكونات البنية اللاحقة. ولكن، على عكس لغز الدجاجة والبيضة، نحن نعلم من جاء أولاً.

بنية هرمية

يحتوي مثال تشكل البنية أعلاه- بالاستناد إلى عملية الاضطرابات الفردية التي كونت المجرات الفردية التي تطورت بنحو مستقل بعضها عن بعض- على كثير من فيزياء الانهيار ذات الصلة بهذا الموضوع. يُظهر مزيد من الدراسات أن نجوماً ضخمة تشكلت أولاً- ولكنها إما انفجرت بسرعة إلى سوبرنوفات، مُطلِقةً عناصر أثقل إلى الكون، وإما انهارت إلى ثقوب سوداء Black holes. أدت هذه العناصر الثقيلة دوراً مهما في تطور

الكون اللاحق. فقط بعد ظهور المعادن– التي يدعوها علماء الفلك بالعناصر الثقيلة– استطاعت نجوم أصغر (مثل شمسنا) أن تتشكل من مناطق أبرد وأكثر تكثفاً، وأن تنشأ البنية التي نراها اليوم.

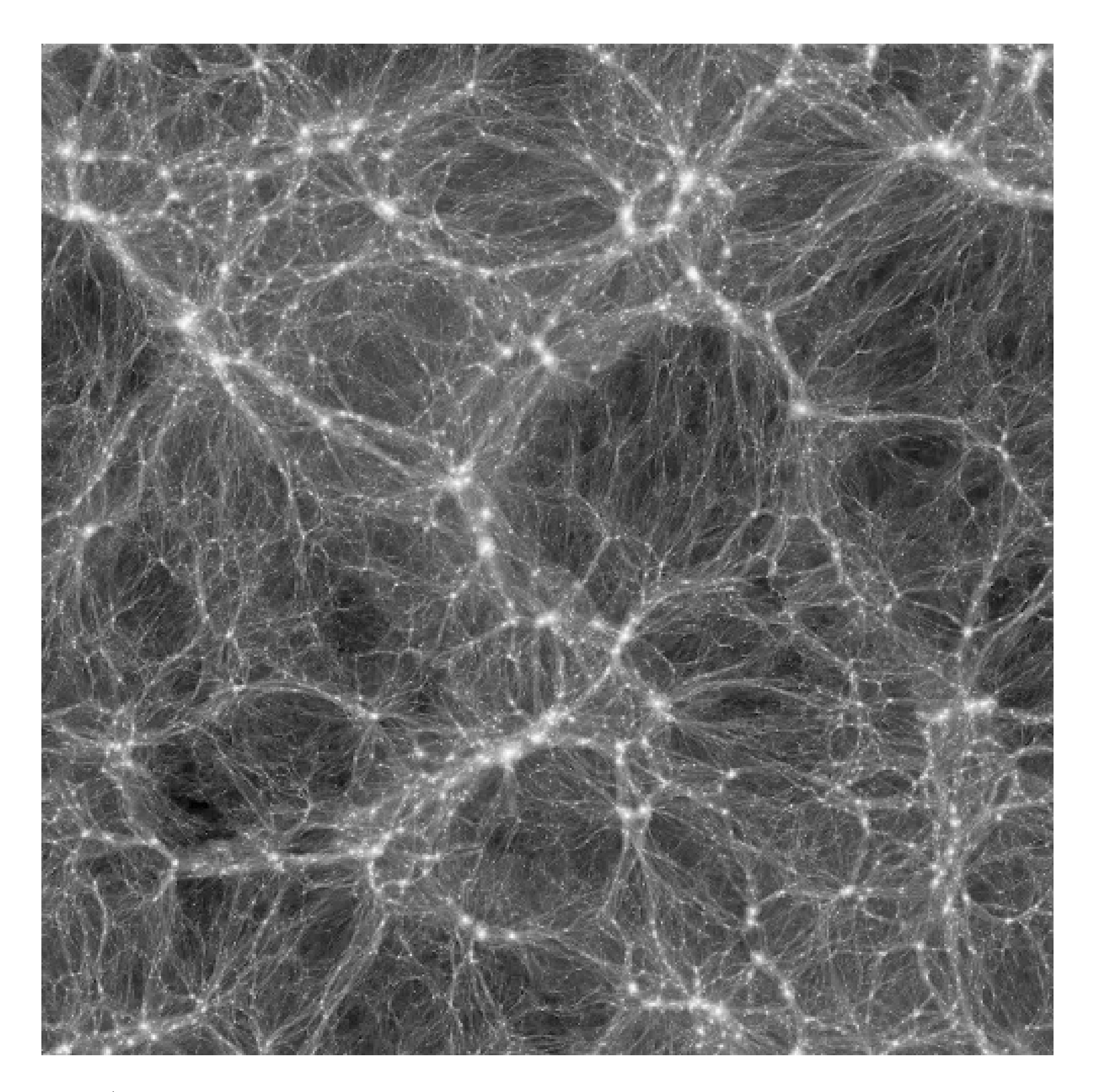
ولكن قبل أن تتشكل هذه النجوم، كان لا بد من ظهور المجرات. في الواقع كانت المجرات أول بنية معقدة تنشأ. كانت المجرات– المكتفية بذاتها ظاهرياً ولكن، كما سنرى، المترابطة بعضها مع بعض- من عدة نواحٍ هي حجر الأساس في الكون. ما أن تشكلت، استطاعت المجرات أن تندمج في بنى أكبر، مثل العناقيد المجرية. وبعد انهيار كافٍ، استطاعت النجوم أن تتشكل داخل أكثر المناطق كثافة. ولكن تشكل البنية التي نراها اليوم بدأ بالمجرات.

غيرَ أن صورة المجرات التي تتشكل بنحوٍ منفرد هي مجرد تبسيط، في الحقيقة، المجرات ليست أكواناً على شاكلة جزر منعزلة كما قد توحي لك هذه الصورة. فالاصطدامات والاندماجات مع مجرات أخرى مهمة لتطورها. إن تشكل المجرة هرمي، إذ تتشكل مجرات أصغر أولاً ثم تتبعها بنى أكبر. حتى المجرات التي تبدو منعزلة هي محاطة بهالات معتمة أكبر تتاخم هالات مجرات أخرى. لأن المجرات تحتل جزءاً كبيراً إلى حد ما من الفضاء– نحو 1 في الألف– تتصادم المجرات أكثر بكثير من النجوم، التي تحتل حجم 1 في العشرة ملايين ترليون تقريباً. من خلال الاندماجات والتفاعلات التجاذبية الأخرى، تستمر المجرات في التأثير في بعضها في بعض.. وتتطور المجرات أكثر فأكثر مع استمرارها في جذب الغاز والنجوم والمادة المعتمة إليها.

بالتسلح بهذه المعرفة الإضافية، فلنُعِدْ دراسة ما حدث في تشكل البنية. لكي نفهم العملية بنحوٍ أفضل، يمكن أن يكون تشبيه الغني يزداد غنى والفقير يزداد فقراً ملائماً بنحو لافت هنا. ومثلما تتزايد وتيرة الحديث عن هذا الوضع ومدى إلحاحه، الفقير لا يزداد فقراً فحسب، بل إن الأغنياء يزدادون عدداً أيضاً. في الواقع، بعض سيناريوهات النهاية الكارثية للبشر- والتي هي موضع نقاش محتدم- والتي أستمع أحيانا لحججها تقول إن الأغنياء سيحشرون في مناطق صغيرة، مدفوعين إلى الحدود على يد المجتمعات الفقيرة المتزايدة. بهذا السيناريو غير الجذاب، سيعيش الأغنياء في أطراف المدن، كما رأيت عندما زرت الأحياء في الضواحي في المناطق الخارجية لديربان، في جنوب إفريقيا. ولكن عندها– عند متابعة تطور التشبيه– ستتعرض المدن المجاورة لظواهر مشابهة أيضاً. لن تكاد تنتشر بنحوٍ كافٍ، حتى تتصادم الأحياء بعضها مع بعض، تاركة الأغنياء فقط عند التقاطعات. قد يستثمر الأغنياء، كسكان منعزلين، في تجارات وأنظمة الحماية، ولكن كل هذه التطورات والنمو السريع ستكون عند العقد حيث تتقاطع طبقات المجتمع المحظوظة.

على رغم أنها ليست صورة جذابة لمجتمع، إلا أنها مشابهة بنحوٍ لافت لطريقة تشكل البنية في الكون. تتوسع المناطق الأقل كثافة بسرعة أكبر من الكون بمجمله، بينما تتوسع المناطق الأكثر كثافة ببطء أكثر. نتيجة لذلك، تدفع المناطق الأقل كثافة المناطق الأكثر كثافة وتحشرها، تاركة إياها على حدود المناطق الأقل كثافة والمتوسعة في الأصل. تستنزف المناطق الأكثر سطوعاً وتتطور إلى فراغات، وتنمو في أثناء ذلك– موجهة المادة إلى صفائح عالية الكثافة عند الحدود.

عندما تتقاطع هذه الصفائح، تتشكل خيوط من مناطق عالية الكثافة. يجمع الشد التجاذبي من هذه المناطق كل "ثراء" المادة. تنحبس هذه الكميات المتزايدة من المادة في شبكة كونية من الصفائح الرقيقة الكثيفة المحيطة بالفراغ. تصبح هذه الشبكة الكونية شبكة من الخيوط فتقبع المادة الأكثف في العقد حيث تتقاطع الخيوط. لذلك بدلاً من انهيار كروي بسيط، تسقط المادة أولاً مع الصفائح إلى خيوط حيث تتقاطع لتشكل عقداً. (انظر: الشكل 7). تزرع هذه العقد بذور تشكل المجرات. وتستمر هذه العملية مع الوقت. تتشكل المادة ويعاد إنشاء الأنماط نفسها، لكن على نطاقات متزايدة المدى. وهذا ما يثمر نموذجاً هرمياً معكوساً حيث تتكون البنى الأصغر قبل الأكبر، وتتشكل فيه المجرات الأصغر أولاً.



[الشكل 7] محاكاة "للشبكة الكونية" للمادة: خيوط من المادة المعتمة التي تتقاطع عند العقد لتحيط بالفراغ المعتم، الفارغ نسبياً. العناقيد المجرية المشار إليها بالمناطق المضيئة جداً تتشكل عند العقد (صورة عن كثافة المادة المعتمة مرسومة على قطعة بسماكة 18 فرسخاً فلكياً وبطول جانبي 179 فرسخاً فلكياً من إعداد بينيديكت ديمر Benedikt Diemer وفيليب مانسفيلد Philip Mansfield، باستخدام خوارزميات التصور لكايلر Kaehler وهان Hahn Hahn وأبيل 2012 ،Abel)

تؤكد كثير من أساليب المحاكاة هذه التوقعات على أكبر نطاق، مع المادة المعتمة المسببة لكثافة وشكل البنية في الكون. قد تكون الاختلافات في نطاقات أصغر إشارات إلى تحسينات إضافية لهذه النظرية، ولكننا سنترك نقاش هذه التنبؤات الأقل جودة من حيث الصياغة والملاحظات الرصدية والنمذجات التي قد تحلها إلى وقت لاحق.

لأن المادة العادية والمادة المعتمة تنهاران بالتزامن، فإن الإشعاع من مجرات المادة المعتمة والمناطق الثقيلة أيضاً يرسم حدود الطاقة المعتمة أيضا. مثلما يرسم الضوء المحيط خريطة المدن على الكرة الأرضية، كذلك ترسم المناطق الأكثر إشعاعاً في الكون خريطة أكثف المناطق المجرية التي تحتوي على أكبر عدد من النجوم. يتتبع الضوء كثافة الكتلة الكلية، مثلما يتتبع ضوء خريطة العالم الكثافة السكانية.

لكن، علينا أن نتذكر أنه عندما يتعلق الأمر بالضوء، يمكن أن يختلف الجزء الذي نراه نسبة إلى الكثافة الحقيقية. تعتمد نسبة المادة المعتمة إلى المادة المضيئة على ما إذا كان الجرم مجرة قزمة، أو مجرة، أو عنقوداً مجرِّياً مثلا. مع ذلك، حتى مع النسب المختلفة، أينما يوجد ضوء، توجد عتمة أيضاً. هذه أداة ملاحظة قيمة في إثبات صحة نظرية تشكل البنية.

محيطنا

قبل إنهاء هذا الفصل– وهذا القسم من الكتاب– فلنلتفت الآن إلى توزيع وتأثير المادة في المجرة التي نعرفها حق المعرفة، درب التبانة Milky Way، ونجمنا المفضل فيها، الشمس. سميت مجرتنا نسبة لحزام الضوء لبني اللون الذي يمكن رؤيته في ليلة صافية جافة. ينشأ هذا الضوء من ضوء متصاعد لعدد لا يحصى من نجوم خافتة على شكل قرص تقع في مستوى درب التبانة. على الرغم من التغليف الموحي للشوكولا السوداء، أُطلقَ على شوكولاتة ميلكي واي Milky Way (التي أحبها والتي أكلت كثيراً منها) اسمُها نسبة إلى الحليب المذاب فيها– والذي من المفترض أن يتاح التمتع بنكهته الشهية المصنعة للجميع.

تقع مجرة درب التبانة في مجموعة مجرات تُعرَف بالمجموعة المحلية Local Group، وهي نظام مجرات مقيدة بالجاذبية وتفوق كثافتها المتوسط. تسيطر مجرتا درب التبانة وأندروميدا (المرأة المسلسلة) Andromeda، المعروفة أيضاً بالعنقود M31، على كتلة المجموعة، ولكن عشرات المجرات الأصغر تنتمي إلى المجموعة أيضاً– ومعظمها تابعة للمجرات الأكبر. تمنع القوة التجاذبية للمجموعة المحلية درب التبانة وأندروميدا من تراجع كل منهما عن الأخرى بفعل توسع هابل. وفعليا يتقارب تراجع كل منهما عن الأخرى وفي نحو أربعة بلايين سنة ستتصادمان وتندمجان.

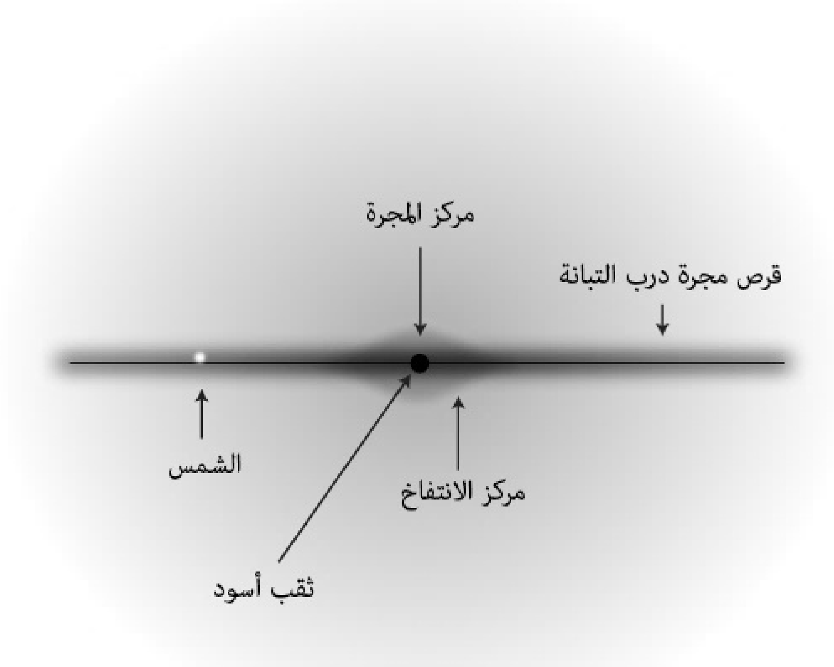
درب التبانة

لدرب التبانة قرص من الغاز ونجوم تمتد بعرض 130,000 سنة ضوئية تقريباً ونحو 2,000 سنة ضوئية عمودياً، مُنتِجا بهذه البنية "شبه المسطحة" شكله المميز. يحتوي القرص على نجوم، إضافة إلى غاز الهيدروجين وغبار جزيئي صغير صلب فيما يعرف بالوسط البينجمي Interstellar medium، والذي تبلغ كتلته الإجمالية عُشر صافي كتلة Net mass النجوم. نحن لا نرى فعلاً التركيز الضوئي الأسطع قرب مركز المجرة حيث تقع معظم النجوم لأن الغبار البينجمي يغشّي الضوء. ولكن يرى علماء الفلك مركز المجرة بالأشعة تحت الحمراء، لأن الغبار لا يمتص هذا الضوء الأقل تردداً. يحتوي مركز درب التبانة أيضاً على ثقب أسود يبلغ نحو أربعة ملايين كتلة شمسية– يعرف أحياناً بالرامي أيه* (Sagittarius A*).

الثقب الأسود في المركز والمادة المعتمة هما شيئان مختلفان تماماً. ولكن المادة المعتمة توجد في هالة كروية ضخمة– بعرض يعادل نحو 650,000 سنة ضوئية. هذا العنصر هو أكبر ما في مجرتنا من حيث الكتلة والحجم إذ يبلغ نحو ترليون كتلة شمسية في منطقة كروية تقريباً تحيط بقرص درب التبانة. كما هي الحال في جميع المجرات، تكثفت المادة المعتمة أولاً وجذبت المادة العادية التي تصنع ما نراه. (انظر: الشكل 8).

ولكن عليَّ أيضاً أن أصف كيف ولماذا يتكون القرص، وهذا مهم بالنسبة إلى فكرة قرص المادة المعتمة وتأثيرها في النيازك، التي سأناقشها بالتفصيل لاحقاً. المادة العادية مثيرة للاهتمام من حيث إن لها توزُّعاً مختلفاً جداً داخل المجرة عن المادة المعتمة. تشكل المادة المعتمة هالة كروية مخفّفة، بينما تستطيع المادة العادية أن تنهار إلى قرص، مثل قرص النجوم المألوف في مستوى درب التبانة.

تفاعل المادة الـعادية مع الإشعاع الكهرومغناطيسي هو المسؤول عن هذا الانهيار. التمييز المهم بين المادة المعتمة والمادة العادية هو أن المادة العادية تـستطيع أن تشع. لولا الإشعاع الذي يؤدي إلى التبريد، لبقيت المادة العادية مخفّفة الكثافة مثل المادة المعتمة. في الواقع، ستكون أقل كثافة لأن ميزانيتها من الطاقة بحجم واحد على خمسة. لكن يتيح تفاعل المادة العادية مع البروتون أن تبدد الطاقة وتبرد بحيث تنهار في مناطق أكثر تركيزاً– أي في قرص. تشبه خسارة الطاقة عن طريق إطلاق البروتونات التبخرَ، إذ يُطلق تبخر الماء الطاقة من بشرتك. ولكن على عكس المادة المخففة الكثافة، فإنك عادة لا تنهار عندما تتعرق. لكن لأن المادة العادية تستطيع تبديد الطاقة، ينهار الغاز ويتركز في مناطق منهارة أصغر، حيث تزداد كثافته زيادة تفوق كثافة المادة المعتمة.



[الشكل 8] قرص درب التبانة والانتفاخ المركزي، الثقب الأسود، وهالة محيطة من المادة المعتمة. كما يشار إلى موقع الشمس (بغض النظر عن حجمها).

إن سبب وجود المادة العادية على شكل قرص وليس كرة صغيرة هو صافي الدوران Net rotation للمادة، وهو ما ورثته من غيوم الغاز التي أثناء تشكلها حصلت على زخم زاويّ Angular momentum (كمية الحركة الدورانية Momentum of rotation). يخفف التبريد مقاومة الانهيار في أحد الاتجاهات، ولكن الانهيار في الاتجاهين الآخرين تمنعه، أو على الأقل تخففه، قوةُ الطرد المركزي Centrifugal force لدوران الغاز الذي تحتويه. من دون احتكاك Friction أو أي قوة تعمل ضدها، ستواصل البلية الزجاجية التي تحركها - أنت - الحركةَ في مسار دائري من دون توقف. بالمثل، بمجرد أن تدور المادة، ستبقي على زخمها الزاويّ إلى أن يعمل عزم Torque ما عليها أو أن يتبدد زخمها الزاوي مع طاقتها.

بسبب حفظ الزخم الزاوي، لا يمكن للمناطق الغازية أن تنهار بفعالية نحو اتجاه قطري (إشعاعي) Radial direction (المُعرَّف بالدوران) كما في حالة الانهيار في الاتجاه العمودي. فعلى الرغم من أن المادة قد تنهار في الاتجاه الموازي لمحور الدوران، فإنها لا تنهار نحو الاتجاه القطري إلا إذا ألغينا الزخم الزاوي بطريقة ما. هذا الانهيار التفاضلي Differential collapse هو ما يبرر نشوء القرص المسطح لدرب التبانة، الذي نلاحظه يمتد في عرض السماء. كما أنه هو ما يبرر وجود الأقراص في معظم المجرات الحلزونية.

الشمس والمجموعة الشمسية

تهيمن المادة المعتمة على صافي الكتلة للمجرة، ولكن المادة العادية، المتركزة في قرص درب التبانة، تسيطر على العمليات الفيزيائية في مستوى درب التبانة Milky Way plane. على الرغم من أن للمادة العادية دوراً محدوداً في ابتداء تشكيل البنية، ولكن بفعل كثافتها المرتفعة وتفاعلاتها النووية والكهرومغناطيسية، فإن المادة العادية رئيسة في عديد من العمليات الفيزيائية المهمة- بما في ذلك تشكيل النجوم.

إن النجوم هي كرات غاز ساخنة ومتكثفة ومقيدة بالجاذبية تتغذى بالاندماج النووي. وهي تتولد في المناطق الغازية الكثيفة من المجرة. ففي أثناء دوران الغاز في قرص مركز المجرة، يتكسر إلى غيوم لتتكون مناطق أكثف يمكنها أن تنهار أكثر وهكذا تشكلت النجوم من الغاز الذي انهار إلى كثافات عالية جداً داخل هذه الهالات.

من بين هذه الكرات الغازية، بدأت شمسنا قبل 4.56 بليون سنة بوصفها نظاماً نشطاً أثرت فيه الجاذبية وضغط الغاز والحقول المغناطيسية والدوران. وقد عثرنا على مذنبات تحتوي على مواد قديمة قِدَمَ المجموعة الشمسية، وتوجد عينات منها في كثير من المتاحف. تقع الشمس قريبا جدا من منتصف مستوى قرص درب التبانة، على بعد يعادل نحو 27,000 سنة ضوئية من مركز المجرة- أي أبعد قطريا عما لا يقل عن ثلاثة أرباع النجوم الأخرى.

مثل مئة بليون نجم آخر في قرص درب التبانة، تدور الشمس حول المجرة بسرعة نحو 220 كم/ثانية. بهذه السرعة، تستغرق الشمس نحو 240 مليون سنة لتدور حول المركز المجري. ولأن عمر المستوى المجري أقل من 10 بلايين سنة، فإن النجوم في المستوى المجري كانت قد دارت بما هو أقل من 50 دورة بحلول ذلك الوقت. وهو وقت كافٍ للنظام ليُجانس بعض الملامح النافرة، ولكن حقا ليست هذه بالدورات الكثيرة.

إن المجموعة الشمسية وتشكيلها هي واحدة من كثير من المواضيع العلمية التي ازدهرت معرفتنا بها في العقود الأخيرة. كما هي حال معظم النجوم، نشأت الشمس والمجموعة الشمسية من غيمة غاز جزيئية ضخمة. قبل ولادة الشمس تحرك كل شيء في الجوار الشمسي بسرعة، وحدثت الاصطدامات بنحوٍ متكرر. بعد نحو مئة ألف سنة، انهار النظام إلى نجم أولي Protostar، لم يكن الاندماج النووي قد بدأ بعد، وإلى قرص كوكبي أوليProtoplanetary، وهو ما سيتحول في النهاية إلى كواكب وعناصر أخرى في المجموعة الشمسية. بعد نحو 50 مليون سنة بدأ الهيدروجين الاندماج وظهرت شمسنا إلى الوجود. التهمت الشمس معظم الكتل من الغيمة السديمية، ولكن بقيت بعض المواد لتتجمع في قرص حول الشمس، والذي ستنشأ منه الكواكب وعناصر المجموعة الشمسية الأخرى كالمذنبات والكويكبات. وعندما أصبحت الطاقة التي تنتجها الشمس قادرة على مقاومة الانكماش التجاذبي، ولدت المجموعة الشمسية.

ما فاجأني أنا وزملائي حقاً هو الدور الحساس الذي تؤديه الجزيئات والعناصر الثقيلة في تبريد الغاز بقدرٍ كافٍ ليسمح بـتشكل معظم النجوم. لم تكن العـناصر الثقيلة مهمة للاحتراق النووي فحسب. بل إنها أساسية أيضاً في ترك المادة تبرد من خلال التشتت إلى نقاط يكون فيها الاحتراق خيارياً. يتطلب تشكل نجم بحجم الشمس إلى درجات برودة شديدة- عشرات الدرجات الكلفن. لأن الغاز مرتفعَ الحرارة بشكل زائد لا

يتركز بما يكفي ليُشعل الاحتراق النووي. وفي ارتباط مذهل آخر بين العملية الأساسية الجوهرية وبين طبيعة الكون، من دون العناصر الثقيلة والتبريد الجزيئي الذي تتعرض له المادة العادية، لما برد الغاز الذي أنشأ الشمس إلى درجة حرارة باردة بما فيها الكفاية.

فقط بعد أن بدأت بحثي الحديث- الذي يركز على تفاصيل الأنظمة الفلكية أكثر من عملي السابق في فيزياء الجسيمات- قدّرت جمال وتناغم الأنظمة الديناميكية في الكون. تتشكل المجرات، وتولد النجوم، وتساهم العناصر الثقيلة التي صنعتها هذه النجوم والغاز الذي تقذفه في تشكيل نجوم أخرى. على العكس مما يبدو عند النظر من مقياس الزمن البشري، فإن الكون وكل شيء فيه بعيد كل البعد عن السكون. لا تتطور النجوم فحسب، بل المجرات كذلك.

يركز القسم التالي من الكتاب على المجموعة الشمسية، ويناقش الكويكبات والمذنبات والاصطدامات، إضافة إلى نشوء الحياة واختفائها. سنرى أن النمط نفسه من التفاعلات والتغيرات حقيقي أيضاً حتى في بيئتنا الأقرب.

القسم الثاني

نظام شمسي نشط

عند زيارتي للصحراء بالقرب من غراند جنكشون Grand Junction، كولورادو، غمرتني السعادة لأن أحدهم أعارني نظارات للرؤية الليلية. هذه النظارات فعالة جداً إلى درجة أن القوانين الحالية تمنع من تصديرها خارج الولايات المتحدة. إنها تزيد من الضوء بحيث إن الأشياء المعتمة بالنسبة إلى العين البشرية تصبح ساطعة بما يكفي لرؤيتها. ويستخدمها الجيش للبحث عن مقاتلي الأعداء، في حين يستخدمها سكان الجبال للعثور على الحيوانات الليلية.

غير مهتمة بأي من هذه الاستعمالات، انتهزتُ الفرصة ونظرت إلى السماء، حيث أرى أجراما باهتة جداً إلى درجة أنني لن أراها من دون مساعدة. أكثر ما أذهلني أنني لاحظت في السماء الصافية الجافة تواتر "الشهب" Shooting stars– ونيازك Meteoroids صغيرة تحترق في الجو. خلال بضع دقائق، ربما دخلت خمسة أو عشرة منها داخل مجال بصري. كنت محظوظة لأنني نظرت إلى السماء في أثناء انهمار نيزكي، حيث مرت خطوط الضوء بتواتر أعلى مما هو عليه في العادة. ولكن حتى من دون هطل شهابي يرفع المعدل، تحترق حبات الرمل في السماء طوال الوقت.

الشهب Meteors الناتجة من حبات الغبار هذه أمر مثير جداً. يضيء ضوءٌ بديع، ينطلق من غبار أو حصى تطير في الفضاء فينشر أشعة الرومانسية والغموض. هذا عندما لا تثير هواجس الدمار. لا أحد يرغب في أن يضرب بحجر بسرعة عالية، مهما كان صغيراً. وحتماً لا نريد صخرة كبيرة أن تضرب الأرض. من حسن الحظ، على الرغم من بعض الأوقات النادرة عندما ضربت أو أوشكت فيها أن تضرب الأرضَ أجرامٌ ضخمة بما يكفي لتنزل أضراراً، إلا أن معظم الأشياء التي تصل بالقرب منا لا تدعو إلى القلق. إذ يدخل نحو 50 طناً من المواد الفضائية الغلاف الجوي للأرض في كل يوم، تحملها ملايين النيازك الصغيرة. ولا أحد منا يتأثر بها تأثرا ملحوظا.

ركز القسم الأول من الكتاب على المادة المعتمة والكون بمجمله، مع لمحة موجزة عن درب التبانة والمجموعة الشمسية في نهايته. يركز هذا القسم على مجموعتنا الشمسية، وخاصة على هذه الأجرام التي يمكن أن تكون لها علاقة بوجود القرص المعتم. إنه يستكشف ما يمكن أن يأتي من الفضاء إلى الأرض أو إلى محيطنا، إضافة إلى بعض التأثيرات المهمة لبعض المعالم الفلكية على الحياة على كوكبنا. يناقش هذا الفصل الكواكب، الكويكبات، الشهب، النيازك، والأحجار النيزكية– والمصطلحات المربكة والمتغيرة باستمرار التي يستخدمها علماء الفلك. أما الفصل التالي فيلتفت إلى مصدر مسارات أخرى مقيدة بالأرض– المذنبات– والبقاع الأبعد من المجموعة الشمسية حيث تعيش طلائعها.

حدود ضبابية

أنا ومساعديَّ علماءُ في فيزياء الجسيمات أساسا. هذا يعني أننا ندرس خواص الجسيمات الأولية– المكون الأساسي للمادة. في المقابل، يركز علماء الفلك في دراساتهم على الأجرام الأكبر في السماء. إنهم يدرسون ماهية هذه الأجرام وكيف اندمجت من مواد أولية لتتطور إلى ما نراه اليوم. يُعرِّف علماء فيزياء الجسيمات بابتكار مصطلحات عجيبة أو يستولون على أسماء أشخاص عند تعميد عناصر لم تكتشف بعد– وفي بعض الأحيان عناصر افتراضية صرفة، مثل "كوارك" Quark، أو "بوزون هيغز" Higgs boson، أو "أكسيون" Axion. ولكن تبدو مصطلحاتنا منهجية مقارنة بمعظم مصطلحات علم الفلك، والتي تصبح هدفاً لتندر علماء

فيزياء الجسيمات. بسبب نشوئها من سياقها التاريخي بدلاً من تفسير يعتمد على العلم الذي بين أيدينا اليوم، تأتي أعراف التسمية ووحدات القياس في علم الفلك اليوم لتكون سرية وغير حدسية ومربكة. ترتبط المصطلحات عادة بما كان معروفاً أو متكهناً عند اكتشاف شيء ما- بدلاً من أن ترتبط بفهمنا الحالي.

على سبيل المثال، قد تعتقد أن اسم جمهرة النجوم الأولى Population I طريقة جيدة للإشارة إلى النجوم الأولى في الكون. ولكن تشير جمهرة النجوم الأولى إلى مجموعة لاحقة من النجوم، وجمهرة النجوم الثانية Pop II تستخدم لمجموعة أخرى. لذا عندما افتُرضت مجموعةٌ من النجوم الأولى الزائلة، سميت جمهرة النجوم الثالثة. وهناك مثال مربك تماماً هو مصطلح *السديم الكوكبي Planetary nebula*، الذي هو المرحلة النهائية لنجم عملاق أحمر Red giant ولا علاقة له بالكواكب. برز هذا الاسم المربك لأن عالم الفلك ويليام هيرشل William Herschel أخطأ في تحديد عنصر رآه في تلسكوبه عندما لاحظه أول مرة في أواخر القرن الثامن عشر.

قد يكون لدى علم الفيزياء الفلكية بعض أكثر المصطلحات إرباكاً، لأن الناس رصدوا المشاهدات الفلكية منذ قرون، وسبقت استنتاجاتهم عصر النظرية التي ستفسر المصطلح تفسيرا سليما. نادراً ما أدرك أحد في وقت الرصد الصورة الأشمل، ولكنها عادة تتشكل في وقت لاحق. من دون فهم أفضل، لم يكن من الممكن ترسيخ الأسماء بمبدأ مُنظِّم سليم.

لا تستثنى من ذلك المصطلحات المستخدمة للكواكب، والكويكبات، والشهب. كانت الفئة الأصلية شديدة الاتساع- أي تحتوي على أجرام من أنواع مختلفة. ولا ندرك ذلك إلا بعد العثور على أجرام جديدة تكشف عن عدم ملاءَمة المصطلح الأصلي. ومع هذا، عادة ما تبقى الأسماء الأصلية، ولكن مع تعاريف متغيرة مع مرور الزمن. أنا عادة متحفظة تجاه تغير الأسماء، وهو ما تميل إلى فعله الأعمال والسياسة عادة لصرف الانتباه عن الأمور الحقيقية. لكن معظم تطور اصطلاحات علم الفلك يعكس تقدمات علمية حقيقية. إن الظاهرة المثيرة التي يمثلها تكاثر المصطلحات الحالي هي التقدم المذهل على مر الوقت في فهمنا للمجموعة الشمسية.

الكواكب

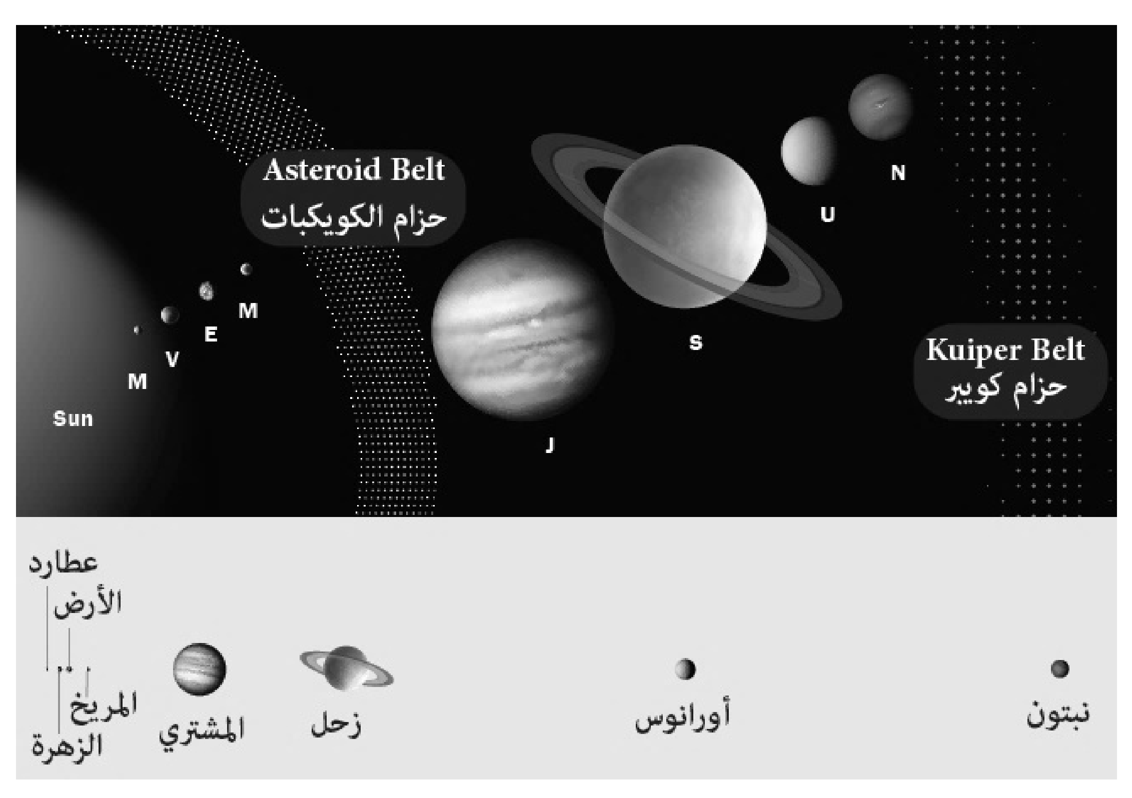
في تجسيدها الأولي، كانت *كلمة Planet* (كوكب) كلمة مختارة بحرية. عندما ابتكر الإغريق المصطلح أول مرة ليصبح كلمة "Planet"، لم يكونوا مدركين للاختلافات بين معظم الأجرام السماوية. احتاج العلماء إلى أدوات قياس أكثر تطوراً لكي يلاحظوا الاختلافات بين بقع الضوء ظاهرياً في السماء. استطاع علماء الفلك الإغريق ملاحظة شيء واحد هو أن بعض العناصر كانت تتحرك، لذلك ابتكروا لها مصطلحاً مختلفاً، *Asters planetai*، أو "الكوكب السيار" Wandering stars. ولكن التعريف الأولي لم يشتمل على الكواكب فقط، بل الشمس والقمر أيضاً.

استدعى المزيد من الاكتشافات ضبطا أكثر للمصطلحات. وإن كان مصطلح كوكب عاماً في الأصل، إلا أنه أصبح مع الوقت حصرياً بقدرٍ متزايد. ضُبط معناه في البداية ليشير إلى خمسة كواكب (عدا الأرض، التي لم تكن مؤهلة ككوكب في نموذج مركزية الأرض Geocentric model) كانت تُرى بالعين المجردة، ومن ثم إلى كواكب أخرى اكتُشفت باستخدام التلسكوبات.

نشأت الكواكب- ما دُمنا قد أصبحنا الآن نفهم المصطلح- بعد ولادة الشمس، عندما جمعت حبات الغبار كميات كبيرة بنحوٍ متزايد من المواد التي تصادمت في حينها، لتتحول بشكل تقريبي إلى حالتها الحالية

على مدى بضعة ملايين إلى بضع عشرات ملايين السنين ربما- مجرد برهة قصيرة من الزمن من وجهة نظر فلكية.

يعتمد تركيب وحالة الكوكب على درجة حرارته- ودرجة الحرارة ذات تأثير مهم في الكويكبات والمذنبات أيضاً. وكما قد تتوقع، فإن المواد التي تلتحم إلى كواكب بالقرب من الشمس تكون أكثر سخونة من تلك التي تتجمع في الكواكب الأبعد. وقد حافظت الحرارة على الماء والميثان بحالته الغازية في منطقة تبعد عن الشمس أربعة أضعاف المسافة الحالية لموقع الأرض، لذلك تكثفت فقط كميات قليلة منها هناك. إضافة إلى ذلك، أرسلت الشمس جسيمات مشحونة أزالت الهيدروجين والهيليوم من الجوار المحلي. لذلك فإن المواد القوية فقط التي لن تنصهر عند درجات الحرارة هذه، مثل الحديد والنيكل والألومنيوم والسيليكات، يمكنها أن تتكثف إلى الكواكب الداخلية.



[الشكل 9] الكواكب الصخرية الداخلية الأربعة والكواكب الغازية الخارجية الأربعة الأخرى بأحجام نسبية كما هو ظاهر. كما يوضح حزام الكويكبات وحزام كويبر. في الأسفل أسماء الكواكب وموقعها النسبي في النظام الشمسي.

فعلياً، هذه هي المادة التي تؤلف الكواكب الأرضية الداخلية الأربعة- عطارد والزهرة والأرض والمريخ. هذه العناصر نادرة نسبياً، لذلك احتاجت الكواكب الداخلية إلى وقت طويل كي تنمو في الحجم. وكانت الاندماجات والاصطدامات أساسية في وصولها إلى أحجامها الحالية، وهي مع ذلك صغيرة مقارنة بالكواكب الخارجية. (انظر: الشكل 9).

على مـسافة أبعد من الشمس، بين مـداري المريخ والمشتري، تقع الحدود التي تبقى وراءها العناصر الطيارة Volatile compounds مـثل الماء والميثان، متجمدة كجليد. تنمو الكواكب في هذه المنطقة الخارجية بفعالية أكبر، لأنها مـصنوعة من مادة متوافرة بقدر أكبر من تلك التي تصنع الكواكب الأرضية Terrestrial plantes. وتتضمن هذه المادة الـهيدروجين، الذي استطاعت أن تراكمه بكميات كبيرة عندما تشكلت بسرعة كافية. هذه الكواكب - المعروفة بالكواكب الغازية - الـضخمة الأربعة (المشتري وزحل وأورانوس ونبتون)

تشكل فيما بينها 99% من كتلة المجموعة الشمسية (عدا الشمس). ويشكل المشتري -الأقرب إلى الخط الفاصل حيث تتراكم المادة - الكتلة الأكبر فيها.

خلال العشرين سنة الماضية، اكتشفت عناصر أخرى شبيهة بالكواكب في مجموعتنا الشمسية– فضلاً عن عديد غيرها والتي اكتشفت في مدارات نجوم أخرى. ولم تعد فئة "كوكب" بسيطة، لأن أعضاء المجموعة أصبحوا يتفاوتون في الأحجام من أصغر من القمر إلى أحجام كبيرة تكفي لإشعال احتراق نووي ذي طابع يشبه ما للنجوم. على الرغم من الدعوات المتكررة لمثل هذه المراجعات إلى تعريفات أكثر رسمية– بقي سيريس Ceres كوكباً على مدى خمسين سنة بعد اكتشافه قبل أن يعاد تصنيفه كويكباً- كانت النقاشات الأخيرة حديثة بما يكفي لتلفت انتباه كثيرين منا إلى هذا الجدل عندما أثير.

قد تتذكر الأخبار حول ما إذا كان بلوتو لا يزال يتمتع بصفات الكوكب. ولا يزال علماء الفلك يتجادلون بنحوٍ غير رسمي حول الموضوع، بل ويصوتون أحياناً ليسترد مكانته السابقة. اشتعل هذا النقاش الأولي، الذي كان ساخناً ولكن اعتباطياً نوعاً ما، بسبب بعض الاكتشافات العلمية الحديثة نسبياً. لم يكن النزاع غير متوقع نهائياً، فالناس يعلمون منذ اكتشافه أول مرة في عشرينات القرن العشرين أنه كان غريباً. كان مداره شاذاً– ممتداً– عن غيره من الكواكب الأخرى. وميلانه Inclination– الزاوية المرتبطة بمستوى المجموعة الشمسية– أكبر بكثير. كما كان بلوتو صغيراً جداً مقارنة بالكواكب البعيدة الأخرى في المجموعة الشمسية– المدعوة بالعمالقة الجليدية والغازية. كان من الواضح أنه شاذ في مملكة الكواكب.

ولكن مضت سبعون سنة قبل اكتشاف عدة أجرام مشابهة في مدارات مجاورة لتبين أن بلوتو الغريب لم يكن مميزاً ولم تكن هناك ضرورة لأن يتفرد عنها بوصفه ككوكب في المقام الأول. كان الجدال في مراجعة تصنيف بلوتو، بالمختصر، شيئاً يشبه ما يستخدم عند صياغة عديد من القوانين الاعتباطية. "إذا تركناك تدخل، علينا عندها أن ندخل الجميع أيضاً". يمكن أن يكون جدالاً بليداً مصمماً لتجنب مزيد من التخطيط الدقيق، ونادراً ما يكون مقنعاً أو مُرضياً. ولكن عثر بالفعل على عناصر مماثلة لبلوتو من حيث الحجم والموقع المداري.

إذا استمر بلوتو بوصفه كوكباً، كذلك سيكون الجرم المشابه المدعو إيريس Eris الذي اكتُشف في العام 2005 وفي الغالب عدة أجرام أخرى أيضاً. كان إيريس مقلقاً بنحوٍ خاص عندما دلت المقاييس على أنه أثقل من بلوتو بنسبة 27%. ومع التهديدات من مزيد من الاكتشافات المشابهة التي لاحت في الأفق، كان لا بد لأحد ما (أو منظمة ما) أن تقرر ما هو الحد الأدنى لكتلة الجرم لكي يستحق رتبة كوكب. ولكن إذا أنزلنا من رتبة بلوتو تُحل المسألة، وهذا ما فعله الاتحاد الفلكي الدولي International Astronomical Union (اختصارا: الاتحاد IAU) في مؤتمره العام في براغ العام 2006. لقد اتبعوا قواعد اللعبة لما يفعله الناس عادة في حالات كهذه. غيروا قواعد الدخول.

لذلك فإن تصنيف كوكب هو الآن مُعرَّف كجرم كروي بسبب جاذبيته الخاصة ويمتاز بـ "خلو محيطه" من أجرام أصغر يمكن أن تدور حول الشمس في جواره. ذلك يعني أن أجراما مثل بلوتو وإيريس، اللذين هما جزء من حزام أجرام مجاورة تدور بالجوار بنحوٍ مستقل، لا تُصنَّف ككواكب بعد الآن. بينما جرمان مثل عطارد والمشتري، كرويان تقريباً ومنعزلان في مدارهما. وعلى الرغم من أنهما يختلفان جداً كلٌّ منهما عن الآخر، فإن كليهما مؤهل لرتبة كوكب.

هذا يعني أنه على الرغم من أن عديداً منا ولدوا في عالم بتسعة كواكب في المجموعة الشمسية، نحن نعيش الآن في عالم فيه ثمانية فقط. قد تجد ذلك محبطاً، ولكن ربما ليس بالدرجة التي اختبرها من ارتاد الجامعة في الولايات المتحدة في العام 1984، عندما خفضت سنهم القانونية من حيث شرب الكحول إلى قُصّر، وذلك بتغيير في القانون في 17 يوليو من تلك السنة. كذلك انخفضت منزلة بلوتو في العام 2006 عندما غير الاتحاد الفلكي الدولي قوانين التصنيف ككوكب.

اللافت للنظر هو تبيُّن أن التقدير الأولي للأحجام النسبية لإيريس وبلوتو مضلل. على الرغم من الاعتقاد بأن إيريس أكبر من بلوتو، كان هامش الخطأ كبيراً جداً، لذلك اضطر علماء الفلك إلى الانتظار لمزيد

من المشاهدات الرصدية المفصلة كي يُثبتوا صحة هذا الادعاء. أظهرت مركبة الفضاء نيوهورايزون (الآفاق الجديدة) New Horizons spacecraft، التي اضطلعت بجولة من قرب حول بلوتو في العام 2015 والتي أثمرت صوراً مذهلة ومعلومات مفصلة أكثر، أن حجم (إن لم يكن كتلة) بلوتو أكبر في الواقع. لو كان هذا الغموض واضحاً منذ البداية، لربما بقي بلوتو بين منازل النخبة.

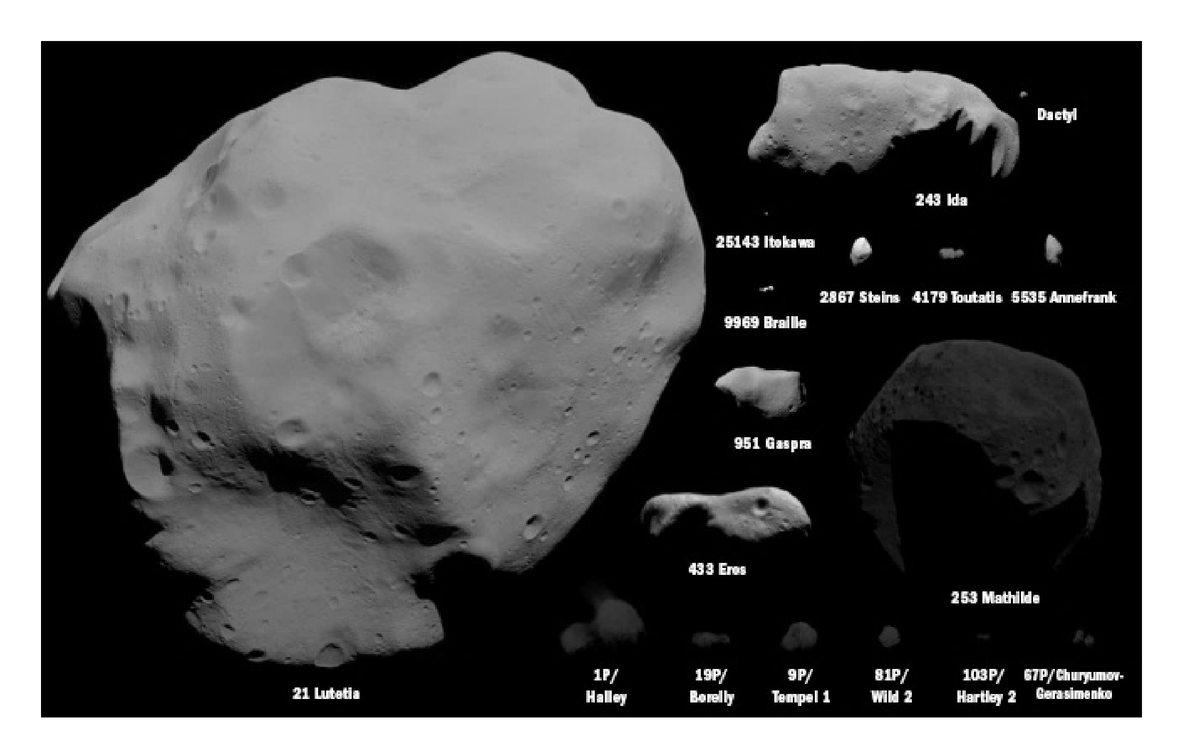
كجائزة ترضية، في الاجتماع نفسه الذي أعاد تعريف "كوكب"، ابتكر الاتحاد الفلكي الدولي مصطلح كوكب قزم *Dwarf planet* لأجرام مثل بلوتو الذي يقع (مجازياً) بين فجوات الكويكبات والكواكب. أصبح بلوتو أول عضو والنموذج لهذا النادي المُنشأ حديثاً. أما الاسم كوكب قزم فكان ولا يزال موضوع جدل، لأنه، على عكس النجوم القزمة، التي هي في الواقع نجوم- الكواكب القزمة ليست في الواقع كواكب. ظهر الاسم بالطبع لأن التمييز لم يكن واضحاً من البداية. ربما كانت الأسماء المقترحة الأخرى أكثر سخافة، مثل "Planetoid" أو "Subplanet ".

كالكواكب، يجب أن تدور الكواكب القزمة حول الشمس، وليس أن تدور كالقمر حول كوكب آخر. إنها على عكس الكويكبات من حيث إنها ليست صخوراً مشكلة اعتباطياً. بحسب التعريف، يجب أن تكون الكواكب القزمة، التي هي أكبر من الكويكبات، ضخمة بما يكفي لتصبح شبه كروية بقوة جاذبيتها. ولكن الكواكب القزمة لن يكون لديها مدارات مستقلة كالكواكب الحقيقية. بل هناك عديد من الأجرام الأخرى التي تدور في جوارها. فقط افتقادها لهذا الانعزال- لم تُنظِّف محيطها- هو ما استبعدها من منزلة الكواكب. أطلق زميل في فيزياء الفلك طرفة بأن الكواكب- مثل الإدارة العليا- تنظف المدارات المجاورة. والكواكب القزمة ستكون أشبه بزملاء ما بعد الدكتوراه، الذين يعملون بنحوٍ مستقل، ولكن مع ذلك لهم مكاتب بالقرب من طلبة الدراسات العليا- الذين هم كالكويكبات، أقل تشكُّلاً.

حتى هذا اليوم، الكوكب القزم هو فئة محدودة نوعاً ما. بلوتو وسيريس- أكبر الأجرام في حزام الكويكبات ولكن أصغر الكواكب القزمة المعروفة- هما الكوكبان القزمان المثبتان فقط. سيريس هو الوحيد في المجموعة الشمسية الداخلية. أما الأجرام الأبعد- هاوميا Haumea وماكيماكي Makemake وإيريس- فقد اعتُرف بها رسمياً، لأنها كبيرة بما يكفي ومن شبه المؤكد أنها كروية، على الرغم من الحاجة إلى توثيق شكلها بمشاهدات رصدية إضافية. هناك مرشحون يفون بالمواصفات أيضاً، مثل الجرم الغامض سِدْنا Sedna، ولكن سنعرف فقط بعد استكمال قياسات أفضل له. لكن يعتقد عديد من علماء الفلك أن هناك مزيداً- ربما نحو 100 إلى 200 كوكب قزم موجود في حزام كويبر Kuiper belt البعيد، الذي سنلتفت إليه قريباً. حزام كويبر هو على الأرجح المكان الذي تنشأ فيه الأجرام السابقة الذكر، وفي الغالب هو مصدر عديد من الأنواع المماثلة التي لم تُكتشَف بعد.

كويكبات

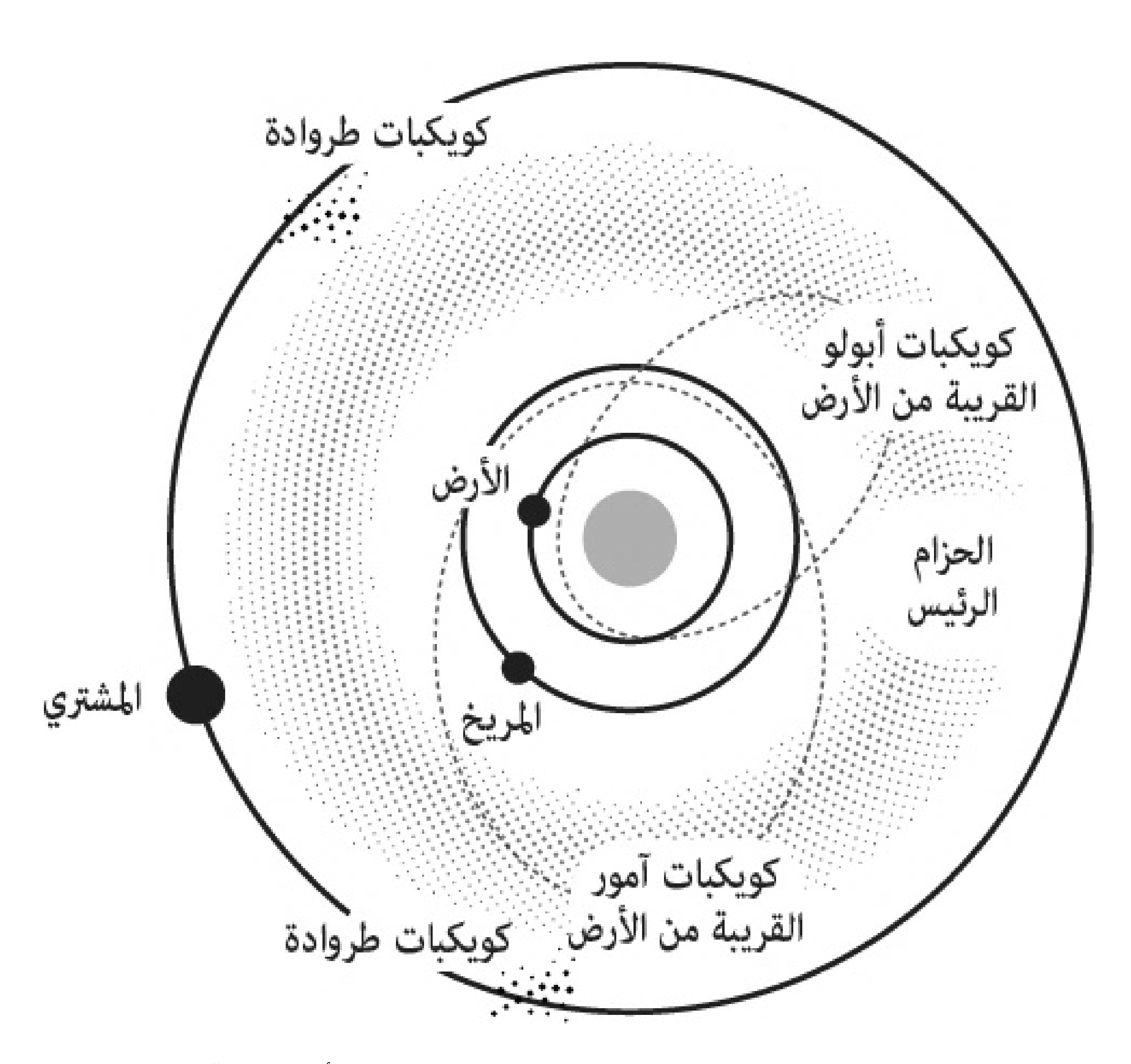
على عكس "كوكب" و"كوكب قزم"، يبقى مصطلح "كويكبات" Asteroid غامضاً ومتداولاً لأن المجتمعات الفلكية لم تعرفه بنحوٍ رسمي. حتى منتصف القرن التاسع عشر، بقيت كلمتا "كويكب" و"كوكب" تُستخدَمان بنحوٍ متبادل- واعتُبِرتا مترادفتين. عندما نستخدم مصطلح كويكب اليوم، نشير بوجهٍ عام إلى جرم أكبر من النيزك ولكن أصغر من الكوكب- يحتوي على أجرام في المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية والذي يتراوح حجمه بين عشرات المترات عرضاً ونحو ألف كيلومتر. كما وصفها الكاتب النيويوركي جوناثان بليتزر Jonathan Blitzer وصفا مناسبا: "الكويكبات هي أكثر منبوذي المجموعة الشمسية خبرة: أجرام صخرية، في مدار حول الشمس، بقايا من تشكيل المجموعة الشمسية، أصغر من أن تكون كواكبَ، وأكبر من أن تُهمَل، يمكنها أن تكشف قدراً كبيراً عن تاريخنا الأولي".



[الشكل 10] صور لكويكبات ومذنبات زارتها المركبة الفضائية منذ أغسطس 2014، تتراوح الأحجام بين 100 كم إلى جزء من الكيلومتر. (تكوين الصور من قبل إيميلي لاكداوالا. البيانات من NASA / JPL / JHUAPL/ UMD / JAXA / ESA / OSIRIS / الأكاديمية الروسية للعلوم / وكالة الفضاء الصينية الوطنية. عالج الصورة: إيميلي لاكداوالا، دانيل ماتشاكيك، تيد ستريك، غوردان أوغاركوفيك.)

على عكس الكواكب القزمة، عادة ما تتشكل الكويكبات من دون أي انتظام. (انظر: الشكل 10). الحد الأدنى والأعلى الملاحظ لمعدل دوران الكويكبات يجعل العلماء يشكون في أن معظمها ليست أجراماً مقيدة بإحكام، ولكنها مجرد تراكمات من حطام، بما أن الحصى سيتطاير إذا كانت سرعات الدوران أعلى. يأتي دعم هذا التنبؤ من مركبة فضائية قامت بزيارة الكويكبات، ومن بعض المشاهدات الرصدية القليلة لأقمار الكويكبات، وكلتاهما تشير إلى أن كثافة الكويكبات كثافة منخفضة.

ليست الكويكبات قليلة ولا هي غير متوافرة. بل ربما كانت هناك البلايين منها. وهي تختلف بقدرٍ شاسع في تكوينها. معظمها إما أن تكون كويكبات حجرية من النمط S، المؤلفة من سيليكات صخور عادية توجد معظمها بالقرب من المريخ، وإما أن تكون من النمط C، الغنية بالكربون، والتي توجد في الغالب بالقرب من المشتري. يستحوذ الأخير على اهتمام خاص عندما يفكر الناس في أصل الحياة في المجموعة الشمسية لأن الكربون أساسي للحياة كما نعرفها. على نحوٍ مثير، تبين دراسات مخبرية تناولت النيازك Meteorites أن بعض الكويكبات Asteroids تحتوي أيضاً على كميات ضئيلة من الأحماض الأمينية Amino acids، مما يجعلها مثيرة للاهتمام بقدرٍ أكبر من هذا المنظور. سنرى في الفصل التالي أن هذا ينطبق أيضا على المذنبات Comets، ما يجعلها موضوعاً مهماً آخر عند التفكير في أصل الحياة، وهو ما سأتناوله في وقت لاحق. الماء أيضاً مكون أساسي للحياة وبعض الأجرام تحتوي على الماء، على الرغم من أن المذنبات عادة تحتوي على كمية أكثر. توجد كويكبات معدنية Metallic asteroids، تتألف بنحوٍ رئيس من الحديد والنيكل، ولكنها أكثر ندرة– لا تمثل إلا نسبة مئوية صغيرة من إجمالي الكويكبات– على الرغم من أن واحداً منها على الأقل دُرِس دراسة مستفيضة نسبياً احتوى على نواة حديد ونيكل وقشرة بازلتية.



[الشكل 11] حزام الكويكبات الرئيس بين المريخ والمشتري، إضافة إلى كويكبات طروادة، ومثال عن كويكب أبولو، وكويكب آمور.

على عكس الكواكب، نادراً ما تكون الكويكبات وحيدة. فهي تدور في مناطق معينة في المجموعة الشمسية، ويرافقها كثير غيرها مما يدور في الجوار. يقع معظمها في حزام الكويكبات Asteroid belt، الذي يمتد من المريخ إلى المنطقة التي تتضمن مدار المشتري، وتمتد عبر الحافة الخارجية للمنطقة الأرضية Terrestrial، والمنطقة الداخلية للكواكب الصخرية Rocky planets، إلى الأجرام الغازية المتجمدة في الجهة الأبعد. (انظر: الشكل 11). يمتد الحزام من نحو 2 وحدة فلكية إلى 4 وحدات فلكية- تقريباً 250 مليون كيلومتر من الشمس إلى نحو 600 مليون كيلومتر منها. خارج الحزام الرئيس، ترتبط مدارات كويكبات *طروادة Trojans*، فئة أخرى من الكويكبات، بمدار كوكب أكبر أو قمر- لتضمن ثباتها مع مرور الزمن.

تَوزُّع الكويكبات

حدث كثير من التقدم في علم تشكل حزام الكويكبات، بدءاً من بداية الألفية الثانية، عندما بدأ علماء الفلك يفهمون هجرة الكواكب في بداية عمر المجموعة الشمسية. نحن نعلم الآن أنه بعد بضعة ملايين سنة

من بدء تشكل الكواكب، أضاءت جسيمات مشحونة مقذوفة من الشمس معظم الغاز والغبار المتبقي من القرص. عندها انتهى تشكل الكواكب. ولكن لم ينته تشكل المجموعة الشمسية. تحركت الكواكب بعد هذا الوقت، أحياناً بشكل معرقل، مُبعثِرَةً المادة إلى خارج المجموعة الشمسية بكاملها، أو بتحريك أجرام أخرى هنا وهناك. من أهم تطورات البحث العلمي في علم الكواكب في العقود الأخيرة الماضية تقدير وإدراك دور هجرة الكواكب هذه في تشكيل المجموعة الشمسية كما نعرفها. تحركت الكواكب الغازية بطريقة أكثر أهمية، مؤثرة في تطور الكويكبات والمذنبات. هاجرت الكواكب الداخلية أيضاً نحو الداخل، ولكن قليلاً فقط. ولذلك ربما كان لها دور أقل. من المرجح أن عدداً كبيراً من الكويكبات أرسلت إلى المجموعة الشمسية الداخلية عندما ضايقتها حركة عديد من الكواكب نحو الخارج والمشتري يتحرك نحو الداخل- مبتدئاً حدثاً يعرف بالقصف الشديد المتأخر Late Heavy Bombardment، الذي حدث منذ نحو أربعة بلايين سنة (نحو 500 مليون سنة بعد تشكل المجموعة الشمسية). تقدم الفوهات الصدمية على القمر وعلى عطارد الناتجة من هذه الاصطدامات الدليل على هذا الحدث.

يعتقد علماء الفلك أن الكويكبات هي بقايا القرص الكوكبي البدائي الذي كان موجوداً قبل تشكل الكواكب. ربما كان لحزام الكويكبات كتلة أكبر بكثير في البداية- التي فقد معظمها في الأيام الأولى الديناميكية في عمر المجموعة الشمسية. بعثر المشتري أولاً كثيراً من الأجرام في منطقته قبل أن تتمكن من الاندماج، وهذا ما يفسر ربما انعدام الكواكب في المنطقة. لأنه فقد كثيراً من المواد- على الرغم من أن للحزام مئات آلاف الأجرام التي يتجاوز قطرها الكيلومتر الواحد- تبلغ كتلته الإجمالية اليوم ربع كتلة القمر، وتشكل كتلة سيريس وحده ثلث هذه الكمية. عند جمع كتلة سيريس مع كتلة أكبر ثلاثة كويكبات، تصل كتلتها إلى نصف الكتلة الإجمالية، بينما تشكل البقية ملايين الأجرام الأصغر. إضافة إلى مئات آلاف أو ربما ملايين الكويكبات التي يتجاوز عرضها كيلومترا واحدا، يحتوي الحزام على مزيد من الكويكبات الأصغر. على الرغم من أن رؤيتها أصعب، وتتزايد أعداد الأحجام الصغيرة، مع قياس تقريبي يقارب عناصر أكثر بنحو 100 ضعف ولكنها أصغر بنحو 10 أضعاف.

في عملية قذف الكويكبات الصغيرة من منطقة حزام الكويكبات، ربما رمى المشتري بعض الأجرام الحاملة للماء إلى الأرض. على الرغم من أن أصل الماء على الأرض غير مفهوم تماماً، ربما تكون هذه الاصطدامات الأولى التي أحدثها المشتري قد أدت دوراً ما في حصول الأرض على مؤونتها الغزيرة من الماء بما أن الماء بشكل أولي ممكن أن يتراكم بسهولة وبكميات كافية في الأطراف الخارجية الأبرد للمجموعة الشمسية. اللافت للنظر، "سريعا" (على المقياس الجيولوجي) بعد انتهاء مشهد القصف الشديد المتأخر- منذ نحو 3.8 بليون سنة خلت- أنه بدأت تظهر الحياة، لحسن الحظ فرصَ دوامها، فإن تواتر الاصطدامات أقل في يومنا هذا، كما أنها أصغر حجما، ولم تعد الكويكبات والمذنبات تسقط على الكوكب بمعدلات خطيرة كما كانت من قبل.

مثل الكواكب، ارتبط أول الكويكبات التي اكتشفت برموز مختلفة. مع حلول العام 1855 كان هناك نحو اثني عشر كويكباً. كانت أسماء عديد منها ترتبط بأصول خرافية، ولكن اكتشافات حديثة ربطت هذه الأسماء العجيبة بأيقونات شعبية- مثل "جيمس بوند"، و"القط شيشاير"- وحتى أسماء أقرباء المكتشفين. يذكرني النظر إلى رموز الكويكبات المنفردة بالنظر إلى لوح من الكتابة الهيروغليفية. (انظر: الشكل 12). كما قال زميلي، إنها تشبه الاسم الذي أُعطيَ "للفنان المعروف سابقاً بـ برينس Prince (الأمير)". التشبيه ملائم جداً لأن هذه الأجرام، مثل برينس نفسه، أصبحت لها الآن أسماء أسهل لفظاً.

الكويكب الرمز	الرمز	السنة
1 سيريس	⚳	1801
2 باللاس	⚴	1801
3 جونو	⚵	1804
4 فيستا	⚶	1807
5 أستراايا		1845
6 هيبي		1847
7 آيريس		1847
8 فلورا		1847
9 ميتيس		1848
10هيجيا		1849

[الشكل 12] أسماء ورموز وتواريخ اكتشاف أول عشر كويكبات.

لعل الـعلماء في الأوقات السابقة تناولوا اكتشافاتهم بطرق سرية لا تختلف عن المصريين القدامى. هذا لا يعني القول إن القدامى لم يحاولوا العثور على النظام. ولكن الكون مكان معقد جداً بحيث إن الوقت والتفرغ والتـقنية ضرورية لتصنيف طبيعة الأشياء التي يحتويها تصنيفا سليما. فبقدرة مـحدودة على الملاحظة يصبح من الصعب تمييز ما إذا كان الـجرم يبدو أعتم أو أسطع أو أصغر أو أكبر بسبب حجمه أو تركيبته أو موقعه. الوقت فقط- وأدوات قياس أفضل- يمكنه أن يقود إلى فهم علمي صحيح.

في الوقت الذي اكتُشفت فيه "الكواكب" الأولى، لم يعلم أحد أي شيء عن الكويكبات. الكويكبات- كالكواكب- لا تبعث ضوءا مرئيا بذاتها. بل تسطع الكواكب والكويكبات والنيازك من الضوء الذي تعكسه من الشمس. لكن العثور على الكويكبات هو أكثر صعوبةً، لأنها أصغر بكثير، ولذلك فهي أكثر عتمة وتصعب رؤيتها. أما المذنبات فلها أذيال مجرورة متوهجة، والشهب قريبة نسبياً وساطعة. في المقابل، ليس للكويكبات ملامح واضحة، لذلك كان (ولا يزال) اكتشافها صعباً.

في الواقع، استغرق الأمر بضعة آلاف سنة قبل أن يدرك البشر الذين ينظرون إلى السماء أن الكويكبات زينت العلياء. من دون أدوات عالية الحساسة، الطريقة الوحيدة للعثور على هذه الأجرام المعتمة هو التحديق مدةً طويلة- وقد يساعدك أيضاً أن تعرف أين تبحث. اعتمدت المحاولات الأولى على هذا المنطق الأخير. لم يعلم علماء الفلك أفضل مكان للبحث، ولكنهم استخدموا قانوناً إرشادياً اعتقدوا أنه سيساعد في إرشادهم في

بحثهم. بدا قانون تيتيوس-بود Titius-Bode law الذي استخدموه متوافقاً مع مواقع الكواكب المعروفة وتنبأ بمواقع كواكب أخرى. واكتشاف كوكب أورانوس في العام 1781 في المكان الذي تنبأ به القانون بدا كنجاح باهر للقانون. ومع ذلك، لم تكن هناك نظرية صحيحة لتبرر "القانون"، وفي أي حال من الأحوال، لا يتطابق موقع نبتون مع ما تنبأ به القانون.

مع ذلك، على الرغم من اعتباطية المواقع المقترحة، كانت التقنية المستخدمة في البحث عن الكواكب (تَذكَّر، في الوقت الذي لم تُكتشَف فيه الكويكبات)- بتقنيات القرن الثامن عشر فقط- تقنيات راسخة. قارن المراقبون مخطوطات السماء في ليال مختلفة وبحثوا عن أجرام تغيرت مواقعها. تحركت الكواكب المجاورة بقدرٍ ملحوظ، بينما بدت النجوم البعيدة ثابتة. باستخدام هذا المنهج (وبإرشاد قانون تيتوس-بود)، اكتشف جوزيبي بياتزي Giuseppe Piazzi، مؤسس ومدير مرصد باليرمو Palermo observatory في صقلية، وقس كاثوليكي، جرماً في ليلة رأس السنة من العام 1801 كان يدور بين المريخ والمشتري، وحسب عالم الرياضيات كارل فريدريتش غاوس Carl Friedrich Gauss بُعدَه عن الأرض.

نحن نعلم الآن أن العنصر الذي اكتشفاه، سيريس، لم يكن كوكباً وإنما كان أول كويكب يُعثَر عليه. وهو يقع فيما نعرف اليوم أنه حزام الكويكبات الواقع بين المريخ والمشتري. وبعد عدة اكتشافات مماثلة تالية، اقترح عالم الفلك السير ويليام هيرشل أن يخصص لها مصطلح Asteroid (كويكب). كان الاسم مستمداً من الكلمة الإغريقية asteroids— التي كانت تعني شبيه النجم، لأنها بدت أشبه بالنقاط منها بالكواكب. كان سيريس، الذي نعلم الآن أنه شبه كروي ويبلغ قطره نحو ألف كيلومتر، مميزاً بشكل خاص عن بقية الكويكبات- فقد تبين أنه أول كوكب قزم يُكتشَف.

كانت الكويكبات مفهومة بالكاد إلى أن تقدمت التقنيات والبرنامج الفضائي حتى أصبح بالإمكان رصد هذه الأجرام رصدا أفضل. إن التطور اللافت والمستمر من قبل الباحثين في هذا المجال هو أمر مذهل. بقدر ما هو مثيرٌ اكتشاف الكويكبات، كان رصدها واستكشافها أكثر إثارة. صمم برنامج الفضاء الحالي عدة مهمات حديثة لهذا الهدف. ستحسن هذه الاستكشافات المباشرة الملاحظات الرصدية السابقة الأقل تفصيلاً التي بدأت في سبعينات القرن العشرين، عندما كشفت صور مقربة أولَ مرة عن أشكال الكويكبات غير المنتظمة.

وهناك مهمة كويكبات أخرى من الماضي تجدر الإشارة إليها، وهي مهمة لدراسة ملتقى الكويكبات القريبة من الأرض- شوميكر Near Earth Asteroid Rendezvous- Shoemaker spacecraft، (اختصارا: المسبار NEAR-Shoemaker) أول مسبار مخصص للكويكبات، الذي التقط صوراً في العام 2001 للكويكب إيروس Eros، وحط عليه، وإيروس هو أول كويكب قريب من الأرض يُكتشَف. وفي العام 2010 جلبت مهمة هايابوسا Hayabusa mission اليابانية عينة من كويكب حجري Stony asteroid، وأطلق العلماء اليابانيون أخيراً مهمة هايابوسا 2 الطموحة، التي ستحط على كويكب وتنشر ثلاثة مسابير لجمع مزيد من العينات مع نهاية هذا العقد. أما ناسا فقد أطلقت مهمة أوسيريس-ريكس OSIRIS-Rex، التي من المتوقع أن تجلب عينات من كويكب كربوني.

الأبرز في الأخبار الحديثة مركبة الفضاء الأوروبية روزيتا Rosetta spacecraf، التي طارت وجمعت معلومات مفصلة عن الكويكبين لوتيتيا Lutetia وستينز Steins قبل ملاقاتها الأكثر شهرة والأحدث مع مذنب. كذلك احتلت مركبة الفضاء دون Dawn التابعة لناسا عناوين الأخبار. إذ أنهت زيارتها إلى الكويكب فيستا Vesta ووصلت الآن إلى الكوكب القزم سيريس.

في المستقبل، من المرجح أن تبحث عمليات التنقيب في الكويكبات التي هي قيد الدراسة حالياً- مع أنها ليست بالضرورة السبيل الأنجع للمكاسب الاقتصادية- عن كويكبات أخرى أيضاً. وكذلك أيضاً قد تكون المركبات الفضائية المصممة للاهتمام لحرف كويكب ما من الاصطدام قيد العمل أيضاً. مثل مهمة إعادة توجيه الكويكب Asteroid Redirect Mission (اختصارا: المهمة RAM)، الذي تطوره ناسا. على الأرجح أن تركيز

البرنامج الفضائي الأمريكي الحالي ينصبُّ على الكويكبات– نظائر الكواكب الأقل بريقاً ولكن سهلة الوصول في كثير من الأحيان– سيعلِّمنا الكثير عن مجموعتنا الشمسية.

الشهب والنيازك والأحجار النيزكية

لننتقل الآن من الكويكبات إلى عناصر أصغر تُعرَف بالنيازك. تعرف دراسة النيازك بالمصطلح غريب المسمع "Meteoritics" (علم الشهب والنيازك)، وليس "Meteorology" (علم الأرصاد الجوية)، الذي ربما كان هو الاسم الأكثر منطقية لدراسة العناصر الحجرية الصغيرة في السماء. ولكن قبل أن يتمكن علم الفلك من المطالبة بالمصطلح، الذي يأتي في الأصل من الكلمة الإغريقية Meteoreon– أي (عالياً في السماء)– وكلمة Logos– أي (معرفة)– استولت عليه دراسات الطقس. من سوء حظ مصطلحات اليوم، اعتقد الإغريق أن دراسات الطقس تلائم مواصفات Meteorology– دراسات العناصر التي في السماء.

ابتكر الاتحاد الفلكي الدولي أول تعريف موحد *للنيازك* Meteoroid في العام 1961، وهو جرم صلب يتحرك في الفضاء الواقع بين الكواكب ويكون أصغر من الكويكب وأكبر من ذرَّة Atom. مع أنه أكثر منطقية من "Meteorology" من منظور فلكي، إلا أنه ليس دقيقاً. في العام 1995، اقترح عالمان تحديد الحجم إلى ما بين 100 ميكرومتر و 10 متر. ولكن عندما عُثر على كويكبات بعرض أصغر من 10 أمتار، اقترح العلماء في مجتمع علم الشهب والنيازك تغيير نطاق الحجم إلى ما بين 10 ميكرومترات ومتر واحد– بحجم أصغر كويكب تمت ملاحظته. ولكن هذا التغيير لم يصبح رسمياً قط. لذا سأستخدم مصطلح "نيزك" Meteoroid بحرية نوعاً ما للإشارة إلى عناصر متوسطة الحجم في السماء، ولكن سأشير إلى عناصر أصغر بأسمائها الأكثر دقة "النيازك الدقيقة" micrometeoroids أو "الغبار الكوني" Cosmic dust.

مثل الكويكبات، تختلف النيازك بنحو جذري في تكوينها، ربما نتيجة تنوع مصادرها الشاسع في المجموعة الشمسية. بعض الأجرام تشبه كرات الثلج بكثافات تبلغ ربع كثافة الجليد، بينما غيرها صخور كثيفة غنية بالنيكل والحديد، في حين لا يزال غيرها يتمتع بوفرة من الكربون.

على الرغم من أن الاستخدام المتداول لمصطلح "شهاب" Meteor يتضمن عادةً النيازك أو النيازك الدقيقة التي صنعتها، يتفق الاستخدام السليم للكلمة مع أصل الكلمة الإغريقي، وهو يعني "معلق في الهواء" ويشير فقط إلى ما نراه في السماء. *الشهاب* هو خيط الضوء المرئي الذي ينتج عندما يخترق نيزك أو نيزك دقيق الغلاف الجوي للأرض. على الرغم من هذا التعريف، يتحدث معظم الناس- حتى الصحافيون- على نحوٍ مغلوط عن شهب تسقط على الأرض، مثل فيلم "النيزك" في عام 1979 المندد به عالمياً، والذي، والحقُّ يقال، كانت فيه لحظات ممتعة.

المضحك في الأمر، أنه مثل المصطلح "Meteorology"، كان لمصطلح "Meteor" تعريف سابق يرتبط بالطقس– يشتمل في الأصل على كل الظواهر المتعلقة بالطقس، كالسيل والإعصار. فكانت الرياح تُسمى "aerial meteor" (هوائي)، وكان المطر والثلج والسيل يسمى "aqueous meteor" (مائي)، أما ظواهر الضوء مثل قوس قزح أو الفلق فكانت تدعى "luminous meteor" (منير)، وكان يدعى البرق وما نسميه الآن بالنيزك "Igneous meteors" (ناري). هذه المصطلحات آثار من أوقات لم يعلم أحد فيها مدى ارتفاع أي شيء أو ما إذا كانت لملامح الطقس أصول مختلفة جذرياً عن الأصول الفلكية. ربما لم يكن مصطلح "Meteorology" مضللاً بالكامل لأن الطقس يرتبط فعلاً بموقعنا في المجموعة الشمسية– ولكن بالطبع باختلاف تام عما كان الاعتقاد في الأصل. من حسن الحظ، على الرغم من سوء فهم "علماء الأرصاد الجوية" في السابق، لم يعد المصطلح "Meteor" يستخدم بهذه الطريقة.

نحن نرى الشهب بسهولة لأن الأجرام التي تصنعها تسخن عند دخولها وترسل مادة متوهجة نراها كضوء- والتي تبدو كقوس بسبب سرعة النيزك العالية. على الرغم من أن كثيراً من الشهب تحدث عشوائياً، فإن الانهمار النيزكي هو حدث منتظم ينشأ من مرور، ولا مجال هنا للمسألة الفلسفية: "إذا سقطت شجرة في الغابة هل نسمع صوتها". إذ لا يعتمد وجود الشهب على راصدين يبحثون بالفعل. يجب أن تكون خيوط الضوء واضحة للعين من حيث المبدأ.

تنشأ معظم الشهب من غبار أو أجرام بحجم الحصى. تدخل الملايين منها إلى مجالنا الجوي يومياً. ولأن معظم النيازك تنهار على ارتفاع 50 كيلومتراً، تحدث الشهب بنحوٍ نمطي بين 75 و100 كيلومتر فوق مستوى سطح البحر فيما يسمى الميزوسفير Mesosphere. ومع أن السرعة الدقيقة تعتمد على خواص الجرم المعينة وانحراف سرعته بالنسبة إلى الأرض، عادة ما تكون سرعة الأجرام المكونة للشهب نحو عشرات الكيلومترات/ ثانية. يساعد مسار الشهاب في تحديد منشأ النيزك الذي أنشأه، في حين يساعد طيف الضوء المرئي الذي يرسله الشهاب وتأثيره في إشارات الراديو العلماءَ على تحديد تركيب النيزك.

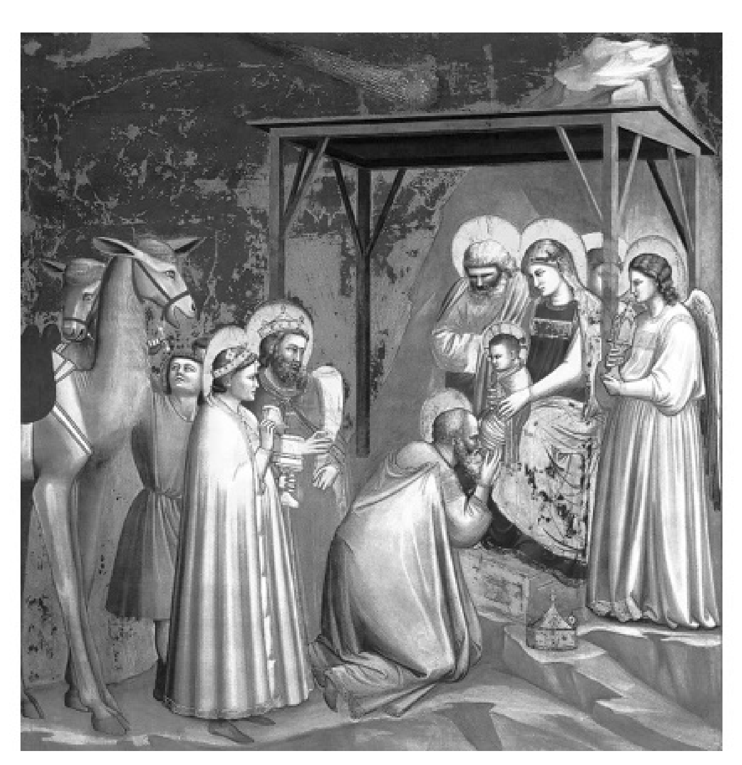
قد تؤدي النيازك التي تخترق الغلاف الجوي وتضرب الأرض إلى *أحجار نيزكية* Meteorites. الأحجار النيزكية هي صخور تسقط على الأرض بعد أن ضرب عنصر فضائي الأرض، وتفكك، وذاب، وتبخر جزئياً. الأحجار النيزكية هي تذكير ملموس بأن الأرض جزء جوهري من بيئة كونية. قد يحالفك الحظ وتجد أحجاراً نيزكية بالقرب من اصطدام نيزكي، ولكن من المرجح أكثر أن تراها في المختبرات والمتاحف، أو في بيوت المهووسين بجمعها. يحتوي متحف مرصد الفاتيكان Vatican Observatory Museum على مجموعة رائعة منها، كذلك المتحف الأمريكي للتاريخ الطبيعي American Museum of Natural History التابع لمجموعة متاحف السمثسونيان Smithsonian's، الذي يحتوي على أكبرها. أخبرني جنرال في الجيش أن وزارة الدفاع تمتلك تشكيلة جميلة منها أيضاً. ترتبط مجموعتهم بالدفاع الصاروخي، ولكن مع الأسف تبقى بياناتهم عن الاصطدامات النيزكية سرية. علمتنا دراسة هذه الأحجار النيزكية التي تمكن العلماء من الوصول إليها كماً كبيراً عن المجموعة الشمسية وأصلها.

يمكن أن تنشأ الأحجاز النيزكية من المذنبات- الأجرام الآتية من المجموعة الشمسية الخارجية والتي سنتعمق فيها في الفصل التالي. تختلف العناصر التي تدور في المجموعة الشمسية الداخلية عن تلك الموجودة في المجموعة الشمسية الخارجية، إذ يشار فقط إلى الأجرام الموجودة داخل مدار المشتري بالكويكبات أو *الكواكب الثانوية Minor planets*، الذي هو- على عكس الكويكبات- مصطلح رسمي وإن كان يبدو غير مهم. قد يبدو الفرق بين المذنبات والكويكبات واضحاً- الفرق الجلي هو ذيل المذنب البارز- ولكن المخطط في الواقع أكثر تفصيلا. للمذنبات عادة مدارات أطول، ولكن لبعض الكويكبات مدارات غريبة أيضاً- ربما لأنها كانت مذنبات في الأصل. فضلاً عن ذلك، ليست الكويكبات المحتوية على الماء مختلفة بالضرورة عن المجتمع المشكل للمذنبات في المجموعة الشمسية الخارجية. يدل هذا التركيب المتنوع للكويكبات على أن المجتمع الذي يعتبر كويكبات وذلك الذي يعتبر مذنبات يتداخلان كلٌّ منهما مع الآخر.

التمييز بينها شديد الضبابية إلى درجة أنه في العام 2006، ابتكر الاتحاد الفلكي الدولي مصطلح جرم مجموعة شمسية صغير Small Solar System body ليشملهما معاً- ولكن ليس الكواكب القزمة. كان من الممكن أن تنضم الكواكب القزمة إلى أجرام مجموعة شمسية صغيرة أيضاً، ولكن لأنها أكبر وأكثر كروية- ما يدل على الجاذبية الأقوى مما يجعلها عناصر صلبة على الأرجح- اختار الاتحاد الفلكي الدولي أن يزيلها من قائمة هذا التصنيف، وأن يميزها باسمها الخاص. بوجه عام، يفضل الاتحاد الفلكي الدولي المصطلح "جرم مجموعة شمسية صغير" على "كوكب ثانوي" تحديداً لأن الأجرام في حزام الكويكبات قد تتمتع بصفات تشبه نواة مذنب. لذلك فإن اسماً واحداً يشملهما معاً- وإن كان أقل بوحا بالمعلومات- يمنع اللغط. ومع ذلك، الكويكبات أكثر صخرية وعادة تحتوي المذنبات على مواد متفجرة بنسبة أكثر، لذلك فإن معظم علماء الفلك يصرون على التمييز.

لكن هذه الاصطلاحات الغربية تتركني في حيرة من أمري، عندما أشير في بقية هذا الكتاب إلى أجرام كبيرة ضربت الأرض. فالأجرام الصغيرة التي تحترق في السماء هي نيازك أو نيازك دقيقة. الأجرام الأكبر، التي تنشأ إما من كويكبات أو مذنبات، تصل أحياناً إلى الأرض أو إلى غلافها الجوي أيضاً. ولكننا لا نستطيع التمييز بينها إلا إذا راقبنا المسار ومن ثم المنشأ. نحتاج إلى مصطلح للإشارة إلى كل منهما. عملياً يلائم المصطلح المزعج "جرم مجموعة شمسية صغير" الوصف، ولكنه نادراً ما يستخدم للعناصر الطيارة الآتية من السماء- خاصة تلك التي تقترب من الأرض أو تضربها. لاحظ العناوين وستجد المفردات "شهاب"، "نيزك"، أو حتى "حجر نيزكي" Meteorite تستخدم بنحو متكرر. حتى إن كانت خاطئة إذا كان العنصر أكبر من متر واحد.. إذ يبدو أنه لا يوجد مصطلح متداول محدد بما يكفي (على الرغم من أن "متصادم" و"نيزك متفجر" يُستخدَمان أحياناً)، سأسمي الأجرام "نيازك"- أفضل الأسوأ من بين هذه الخيارات- في هذا الكتاب عندما أشير إلى جرم من الفضاء الخارجي يدخل إلى المجال الجوي أو يضرب الأرض. هذه إساءة استخدام بسيطة للمصطلح، إذ يشير هذا المصطلح فقط إلى أجرام أصغر. ولكن سيكون ما أعنيه واضحاً من السياق.

إذا سنحت لك فرصة السفر إلى المدينة الإيطالية بادوفا، تأكد من زيارة كنيسة سكروفيني. هذه الجوهرة المصونة بعناية من أوائل القرن الرابع عشر تحتضن تصويرا جصيا مذهلا لفنان النهضة الإيطالي جوتو Giotto. لوحتي المفضلة– والتي يقدّرها كل زملائي الفيزيائيين هناك– هي لوحة تضرّع الملوك The Adoration of the Magi (انظر: الشكل 13)، التي تظهر مذنباً يمر بوضوح فوق مشهد ولادة السيد المسيح الكلاسيكي. وكما اقترحت مؤرخة الفن روبيرتا أولسن Roberta Olson، أن المذنب ربما يحل محل نجمة داود– العنصر الإنشائي الأكثر شيوعا في مثل هذه التصاوير– كعنصر مشع رآه الناس في السماء قبل بضع سنوات فقط من استكمال اللوحة. بغض النظر عن المعنى المجازي، وميض الضوء فوق المهد هو مذنب بلا شك– من المرجح جداً أنه مذنب هالي، الذي لا بد أن رآه كل من في تلك البقعة من العالم. فذيل المذنب الهائل الذي امتد على رقعة كبيرة من السماء في سبتمبر وأكتوبر من العام 1301 هو مشهد خلاب– خاصة في حقبة سبقت الضوء الكهربائي.



[الشكل 13] *تضرُّع الملوك* لجوتو، مع وجود مذنب فوق دار الحضانة التقليدية

أود أن أتأمل كيف كان الإيطاليون في أوائل القرن الرابع عشر ينظرون إلى السماء، ويقدرون العجائب الفلكية التي تدهشنا حاليا. كما تشير الأدلة من الحضارات الصينية والإغريقية القديمة أن البشر كانوا يرصدون المذنبات ويقدرونها حتى قبل ألفي سنة أيضاً. فقد حاول أرسطو أن يفهم طبيعة المذنبات– وأن يُفسِّرها كظواهر في الغلاف الجوي العلوي حيث تبدأ مادة جافة وساخنة بالاحتراق.

لقد قطعنا شوطاً طويلا منذ عصور الإغريق القدامى. إذ علمتنا أفكار العلماء الأكثر حداثة المستندة إلى الرياضيات والرصد الأفضل أن المذنبات باردة، لا شيء يحترق، والمادة المتفجرة التي تحتويها تتحول إلى بخار غازي أو ماء بمجرد أن تقترب من الشمس.

الآن بعد أن استكشفنا طبيعة الكويكبات، التي تأتي من الجوار القريب نسبياً في المجموعة الشمسية، لننتقل إلى المذنبات، التي تنشأ من نطاقات تعرف بالقرص المبعثر Scattered disk– الذي يتداخل مع حزام كايبر– وسحابة أوورت Oort cloud– الذي يقع في الأصقاع البعيدة في مجموعتنا الشمسية. هذا وهناك مذنبات في الأنظمة النجمية الأخرى أيضاً. ولكن تركيزنا هنا سيكون على تلك التي نعرفها حق المعرفة– تلك التي تنشأ داخل مجالنا.

طبيعة المذنبات

مع أننا نعلم حالياً أن المذنبات تنشأ من مناطق بعيدة، ونادراً ما تتبع مسارات تأتي بها قريبا من الأرض، كان استنتاج تيخو براهي Tycho Brahe في القرن السادس عشر بأن المذنبات توجد خارج الغلاف الجوي للأرض نقطةً مهمة وقديمة في الإدراك العلمي. قاس تيخو اختلاف المنظر Parallax [التغير الظاهري في موقع الجرم] المذنب العظيم في عام 1577 عن طريق دمج مشاهدات من راصدين في مناطق مختلفة– وبذلك حدد أن المذنبات تبعد نحو أربعة أضعاف موقع القمر.

قدم إسحاق نيوتن Isaac Newton استنتاجاً مهماً آخر عندما أدرك أن المذنبات تتحرك في مدارات مائلة Oblique orbits. وباستخدام قانونه التربيع العكسي Inverse square law للجاذبية، الذي يقول إن قوة الجاذبية هي أقل بأربعة أضعاف بالنسبة لعنصر يبعد ضعف المسافة، بيّن نيوتن أن الأجرام في السماء عليها أن تتبع مدارا إهليلجيا Elliptical أو مكافئا Parabolic أو زائداً Hyperbolic. عندما طابق نيوتن مسار المذنب العظيم في العام 1680 مع قطع مكافئ، ربط النقاط حرفياً– مبيناً أن الأجرام التي رآها البشر وظنوا أنها مختلفة هي في الواقع تقع على مسار واحد– هي مسار شيء واحد. مع أن مسار المذنب إهليلجي مطوّل، كان المسار يشبه إلى حد بعيد القطع المكافئ من حيث الشكل، وبذلك بقي استنتاج نيوتن أنه جرم واحدٌ متحرك استنتاجا صحيحاً.

في السابق كانت المذنبات المُكتشَفة تسمى وفقاً للسنة التي ظهرت فيها. في أوائل القرن العشرين، تغير أسلوب التسمية، وأصبحت تسمى باسم الشخص الذي تنبأ بمدارها، مثل عالم الفلك الألماني يوهان فرانز إنكي Johann Franz Encke، والنقيب في الجيش وعالم الفلك الهاوي- الألماني النمساوي- فيلهلم فون بيلا Wilhelm von Biela، كل منهما يحمل مذنب اسمه.

على الرغم من تحديده قبل القرن العشرين، سمي المذنب هالي باسم الرجل الذي فهم مساره بما يكفي ليتنبأ بعودة حدوثه. في العام 1705، باستخدام قانون نيوتن وبالأخذ بالحسبان اضطرابات Perturbations مداري المشتري وزحل، تنبأ صديق نيوتن، الناشر إدموند هالي Edmond Halley بأن مذنباً ظهر في الأعوام 1378، 1456، 1531، 1607، و1682 سوف يظهر في العام 1758-1759. كان هالي أول من اقترح الحركة الدورية للمذنب وكان مصيباً. وحسب ثلاثة علماء رياضيات فرنسيون حسابات أكثر دقة وتنبؤوا بظهوره خلال شهر في العام 1759. يمكننا حاليا أن نجري حسابات مماثلة لنحدد أن أحداً على الأرض لن يشهد قبل العام 2061 ظهور المذنب هالي مجدداً.

لاحقاً في القرن العشرين، تغير التقليد مجدداً، ليتحول عن تسمية المذنبات بأسماء مكتشفيها. فبعد أن أصبح اكتشاف المذنبات جهداً جماعياً يستند إلى أدوات الرصد المتقدمة، سميت المذنبات بأسماء الأدوات التي

اكتشفتها. تحتوي القائمة الحالية على 5,000 مذنب، ولكن التقدير المنطقي لعددها الإجمالي هو على الأقل ألف ضعف ذلك، ويمكن أن يكون أكثر من ذلك بكثير- ربما بنحو ترليون.

يتطلب فهم طبيعة وتركيبة المذنبات بعض المعرفة بحالات المادة. الحالات المألوفة للمادة هي الصلبة والسائلة والغازية- في حال الماء لدينا الجليد والماء والبخار. تترتب الذرات بنحو مختلف في كل حالة، فتكون في الجليد الصلب أكثر ترتيباً بنيوياً، بينما في حالة البخار الغازي تكون أكثر عشوائية. عندما تتحول المادة في المرحلة الانتقالية من السائل إلى غاز- كما يحدث عندما يغلي الماء، مثلاً- أو تحول الصلب إلى سائل- كما يحدث عندما تنصهر مكعبات الجليد- تبقى المادة هي نفسها لأن كل الذرات والجزيئات موجودة. ولكن طبيعة المادة تصبح مختلفة. يعتمد الشكل الذي تأخذه المادة على درجة حرارتها وعلى تركيبها- الذي يحدد نقطة غليان وانصهار أي مادة.

شعرت بالمتعة عندما سمعت أن أحداً استفاد أخيراً من المراحل المختلفة للمادة ليمرر زجاجة مياه عبر أجهزة أمن المطار. إذ جمّدها وحاجج بأن الثلج الصلب في زجاجته لا يتعارض مع حظر السوائل. من سوء الحظ، لم يقتنع موظف إدارة أمن النقل. لو كان الموظف يعلم بعض الفيزياء، لحاجج على نحوٍ مثير بأن المواد الصلبة فقط تحت درجة حرارة وضغط قياسيين هي المسموح بها. لكنني متأكدة أن ليس هذا ما قيل. (لاحظ أن درجة الحرارة والفيزياء تؤديان دوراً لأن نقطتَي الغليان والانصهار تختلفان باختلاف الضغط، كما يعلم من حاول صنع الباستا في آسبن، كولورادو، على ارتفاع ثمانية آلاف قدم فوق مستوى سطح البحر).

نقطتا غليان وانصهار المادة مهمتان لأي بنية، لأنهما تحددان الحالة التي ستتخذها المادة. لبعض المواد كالهيدروجين والهيليوم نقطتا غليان وانصهار منخفضتان جداً. يصبح الهيليوم سائلاً، على سبيل المثال، عند درجة 4 فوق الصفر المطلق. يسمي علماء الكواكب هذه العناصر، التي تكون درجة انصهارها أقل من 100 درجة كلفن، بالغازات- بغض النظر عن المرحلة الفعلية لحالة المادة. ويشار إلى العناصر التي لها نقطة انصهار منخفضة، ولكن ليس بدرجة انصهار الغازات- مجدداً من قبل علماء الكواكب- بالجليد، حتى إن اعتمد تحديد حالة المادة إن كانت جليداً أو لا على درجة الحرارة. لهذا يُدعَى المشتري وزحل بالعمالقة الغازية، في حين يدعى نبتون وأورانوس أحياناً بالعمالقة الجليدية. في الحالتين، الداخل هو في الواقع سائل ساخن كثيف.

الغازات (بالمعنى المستخدم في علم الكواكب) مجموعة جزيئية من *المواد المتطايرة Volatiles*، وهي عناصر ومركبات بدرجة غليان منخفضة- مثل النتروجين والهيدروجين وثاني أكسيد الكربون والأمونيا والميثان وثاني أكسيد الكبريت والماء- يمكن أن تكون موجودة على كوكب ما أو في الجو. تتحول المادة بدرجة انصهار منخفضة إلى الحالة الغازية بسهولة. ربما رأيت المثلجات المصنوعة من نتروجين سائل بارد. (هذه ركيزة الطبخ الجزيئي في المطاعم الحديثة- إضافة إلى الاستعراضات العلمية التقليدية. كما استخدمت في واحدة من شاحنات بيع الأطعمة خارج مركز هارفارد العلمي، التي، من حسن الحظ لصحتي، كانت تصنع عادةً مثلجات بنكهات لا أحبها). إذا رأيت مثل هذه الأمثلة، فستلاحظ كيف تهرب ذرات النتروجين كغاز بسهولة عند درجة حرارة الغرفة، لتجعل الآلة تبدو دراماتيكية (وربما تشبه قليلاً صورة كاريكاتورية لتجربة في مختبر).

يحتوي قمر الأرض على القليل من المواد المتطايرة، لأنه يتألف في معظمه من السيليكات، والقليل من الهيدروجين أو النتروجين أو الكربون. تحتوي المذنبات في المقابل على وفرة من المواد المتطايرة، وهذا ما يعطيها شكل الذيل. تتولد المذنبات خلف المشتري في المناطق الخارجية للمجموعة الشمسية، حيث يبقى الماء والميثان بارداً ومتجمداً. في هذه المناطق شديدة البرودة البعيدة عن الشمس، لا يتحول الجليد إلى غاز. بل يبقى الجليد جليداً. فقط عندما تدخل المذنبات إلى المناطق الداخلية للمجموعة الشمسية حيث تصبح أقرب إلى حرارة الشمس تتبخر المواد المتطايرة الموجودة في المذنبات وتندفع، مع بعض الغبار، لتخلق غلافا جوياً حول النواة يدعى الذؤابة Coma. يمكن أن تكون الذؤابة أكبر من النواة- بعرض آلاف وحتى ملايين الكيلومترات، وأحياناً تصل إلى حجم الشمس. تبقى جسيمات الغبار الأكبر في الذؤابة، في حين يدفع إشعاع الشمس وانبعاثات

الجسيمات المشحونة الجسيمات الأخف نحو الذيل. يتألف المذنب من الذؤابة، والنواة التي تحيط بها، والذيل الذي يندفع خارجاً.

وزخات الشهب، التي تنشأ من الحطام الصلب الذي تتركه المذنبات خلفها، هي دليل مذهل على المذنبات. فهي تحدث بعد أن يجتاز المذنب مدار الأرض، فتبقى بعض المواد المخلفة في مسار الأرض. ثم تمر الأرض عبر الحطام بفترات منتظمة لتصنع زخات شهب دورية خلابة. وحطام المذنب سويفت تتل Comet Swift-Tuttle هو أصل زخات شهب البرشاويات Perseid meteor shower، التي تحدث في بداية شهر أغسطس، والتي رأيتها عن غير قصد في السماء الصافية في آسبن، حيث يعقد أحد المراكز الفيزيائية ورشة عمل صيفية. مثال آخر زخات شهب أوريون Orion meteor shower، التي تحدث في أكتوبر وتنشأ من الأجزاء المبعثرة من مذنب هالي.

المذنبات هي من بين الأشياء المذهلة التي يمكننا أن نراها بالعين المجردة. معظمها باهت جداً، ولكن المذنبات مثل هالي، التي يمكن رؤيتها من دون تلسكوب ربما تمر عدة مرات في العقد. تدور المذنبات حول الشمس بذيل إيوني متوهج وذيل غباري منفصل يشيران عادة إلى اتجاهات مختلفة. هذه المسارات المتوهجة من الغبار والغاز المشع هما أصل الاسم، المستمد من الكلمة الإغريقية التي تترجم إلى "الشعر الطويل". بينما يتبع الذيل الغباري بوجهٍ عام مسار المذنب، يكون اتجاه الذيل الأيوني بعيداً عن الشمس. يتشكل الذيل الأيوني عندما تضرب الأشعة الشمسية فوق البنفسجية الذؤابة، مبعثِرةً إلكترونات من بعض الذرات فيها. تصنع الجسيمات المؤينة مجالاً مغناطيسياً فيما يعرف *بالغلاف المغناطيسي Magnetosphere*.

يؤدي شيء يدعى *الرياح الشمسية Solar wind* دوراً في ظهور المذنبات. الجميع يعلم عن أشعة الشمس، التي تطلق الفوتونات التي نشعر بها في الحرارة والضوء على الأرض. ولكن القليلين يعرفون عن الجسيمات المشحونة- الإلكترونات والبروتونات- التي ترسلها الشمس وتشكل الرياح الشمسية. عندما لاحظ العالم الألماني لودوينغ بيرمان Ludwig Biermann (وبنحوٍ مستقل الألماني بول آنيرت Paul Ahnert) في خمسينات القرن العشرين أن ذيل المذنب الأيوني المتوهج يتجه بعيداً عن الشمس، اقترح بيرمان أن الشمس ترسل جسيمات "تدفع" ذيل المذنب، مما يجعلها تتجه بهذه الطريقة. في صورة مجازية، "تدفع" "الرياح الشمسية" الذيل الأيوني. فهْمُ هذه العملية أتاح للعلماء فهم المزيد عن المذنبات وعن الشمس- وأدركت أنا أصل الاسم الغريب.

قد يمتد ذيل المذنبات إلى عشرة ملايين كيلو متر. بالطبع إن أحجام نوى المذنبات أصغر بكثير ولكنها كبيرة مع ذلك مقارنة مع الكويكب النموذجي. لا تمتلك النوى جاذبية كافية لتكوّر بنيتها، لذلك فإن لها أشكالاً غير منتظمة، تختلف بالحجم من عدة مئات الأمتار إلى عشرات الكيلومترات عرضاً. قد يؤدي هذا إلى تحيز في الرصد، لأن المذنبات الأكبر يسهل إيجادها أكثر، ولكن الأبحاث التي تسخر أدوات حساسة بما يكفي للعثور على أجرام أصغر باء الكشف عنها بالإخفاق حتى الآن.

من ناحية سهولة الرؤية، من المفيد أن للمذنبات نوى وأذيالاً. نوى المذنبات غير عاكسة، لذا من الصعب جداً رؤيتها، لأن أكثر طريقة شائعة لإيجاد العناصر غير المحترقة (مثلك ومثلي) هي عن طريق الضوء. فلنذكرْ مثالا معروفا، تعكس نواة مذنب هالي فقط نحو 1/25 من الضوء الذي يضربها، هذا يماثل مع يعكسه الإسفلت أو الفحم، الذي نعلم أنه شديد القتامة. بل وتعكس نوى مذنبات أخرى قدرا أقل من هذا. في الواقع، يبدو أن أسطح المذنبات هي الأعتم في المجموعة الشمسية. تطرد حرارة الشمس المركبات الأخف والأكثر تطايرا، في حين تبقى المركبات العضوية الأكبر والأعتم. وتمتص الموادُ المعتمة الضوءَ، وتسخن الجليد الذي يطلق الغازات ليصبح ذيلاً. إن التشابه في الانعكاس بين الفحم والمذنبات ليس اعتباطيا- تذكر أن القطران أيضاً مصنوع من جزيئات عضوية كبيرة، تحديداً جزيئات البترول. الآن تخيل الإسفلت في السماء على بعد بلايين الكيلومترات. من دون بذل كثير من الجهد في البحث عنه، سيغلف الغموض مثل هذا الجرم.

عندما تكون المذنبات في المنطقة الخارجية من المجموعة الشمسية، تكون قاتمة ومتجمدة وبأبهت الانبعاثات البصرية. الطريقة الوحيدة لمشاهدة المذنبات قبل أن تصل إلى الشمس هي باستخدام الأشعة تحت الحمراء التي ترسلها. فقط عندما تصل إلى المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية تتشكل الذؤابة والذيل وتصبح المذنبات أوضح للرؤية. ومع ذلك، يمكن رؤية معظم المذنبات باستخدام التلسكوب.

إن رصد التركيب الكيميائي الدقيق للمذنبات هو أصعب من رصد الأجرام بحد ذاتها. النيازك التي نعثر عليها على الأرض تقدم لنا الدليل من خلال إيصال جزء من موادها الفعلية إلى كوكبنا. فقد لاحظ العلماء الألوان المختلفة للمذنبات ورصدوا بعضا من خطوطها الطيفية. باستخدام هذه الأدلة الشحيحة، استنتج العلماء أن النواة تتألف من ثلج وغبار وصخور تشبه الحصى، وغازات متجمدة منها ثاني أكسيد الكربون وأول أكسيد الكربون والميثان والأمونيا. وتبدو أسطح النوى كأنها صخرية مع بعض الجليد المدفون تحت السطح بقليل.

نظراً إلى المشاهدات الفلكية المحدودة في عصره، قدم إسحاق نيوتن تفسيراً دقيقاً ولافتاً عن المذنبات في القرن السابع عشر. فقد ظن مخطئاً أنها أجسام صلبة مستقرة متماسكة، ولكنه لاحظ أن الذيل كان مساراً رفيعاً من البخار الذي سخنته الشمس. أما من حيث فهم تركيبة المذنبات، فقد توصل الفيلسوف إمانويل كانْت Immanuel Kant في عام 1755 إلى فهم أفضل. إذ خمن أن المذنبات مواد متطايرة تتبخر لتشكل الذيل. في خمسينات القرن العشرين، لاحظ فريد ويبل Fred Whipple من قسم علم الفلك في هارفارد، ومكتشف ستة مذنبات، غلبةَ الجليد في المذنبات، مع وجود الصخور والغبار بقدرٍ ثانوي، مما يعطي شكل "كرة الثلج المغبرة" التي ربما سمعت عنها. في الواقع، التركيب غير مستقر تماماً، وقد تحتوي بعض المذنبات على كمية من الغبار أكثر من غيرها، ولكن المشاهدات الرصدية الأفضل لا تزال تطور معرفتنا في هذا المجال.

وهناك سمة مميزة أخرى في تركيبة المذنبات هي أنها تحتوي على مركبات عضوية، مثل الميثانول وسيانيد الهيدروجين والفورمالديهايد والإيثانول والإيثان، إضافة إلى الهيدروكربونات طويلة السلسلة والأحماض الأمينية، أي المركبات السلائف Precursors للحياة. كما وجد العلماء أن النيازك التي سقطت على الأرض تحتوي على مكونات من الحمض النووي (دنا) DNA والحمض النووي (رنا) RNA التي يفترض أنها جاءت من كويكبات أو مذنبات. من المؤكد أن العناصر التي تضرب الأرض حاملة الماء والأحماض الأمينية تستحق اهتمامنا.

إن تركيبة المذنبات المذهلة واحتمال ارتباطها بالحياة جعلتها هدفاً واضحاً لعدد من المهمات الفضائية. طارت أول مركبة فضائية تدرس المذنبات بالقرب من الذيل وسطح نواة المذنب لجمع وتحليل جسيمات الغبار وربما لالتقاط الصور، ولكن من دون الاقتراب كثيرا من المذنب، ومن دون معدات تصوير عالية المَيْز Resolution بما فيه الكفاية لتزودنا بتفاصيل مهمة. في العام 1985، كان مسبار مستكشف المذنبات الدولي International Cometary Explorer، وهو مهمة أعادت ناسا توجيهها مع دعم أوروبي، وهي أول مركبة فضائية تقترب من ذيل مذنب، ولكن على بعد 3,000 كيلو متر فقط. وسرعان ما تبعته مهمة هالي أرمادا Halley Armada التي تكونت من المهمتين الروسيتين فيغا Vega missions ومهمة سوزي Suisei mission اليابانية، والمركبة الفضائية جوتو Giotto spacecraft الأوروبية في محاولة لدراسة نواة وذؤابة المذنب بنحوٍ أفضل. ولكن مهمة جوتو الآلية– التي سميت تيمناً باسم رسام المذنب في لوحة *تضرّع الملوك*، المذكورة سابقا– تفوقت عليهم جميعاً. استطاعت هذه المركبة الفضائية أن تقترب من نواة مذنب هالي بنحو 600 كيلومتر.

أما المهمات الحديثة التي حاولت استكشاف المذنبات وتركيبها بنحوٍ مباشر فقد جاءت بنتائج أفضل من ذلك بكثير. ففي بداية العام 2004 جمعت المركبة الفضائية ستارداست Stardust spacecraft وحللت جسيمات غبار من ذؤابة مذنب وايلد 2 (Wild 2)، وجلبت بعضا من هذه المادة إلى الأرض في العام 2006. لم تتألف مادة المذنب بنحوٍ رئيس من وسط بينجمي كما كان متوقعاً من جرم متشكل في سحابة أوورت البعيدة، بل كانت في غالبيتها عناصر سخنت داخل المجموعة الشمسية. بيّن العلماء أن المذنبات احتوت على كبريتيد

الحديد وكبريتيد النحاس، اللذين لا يمكن أن يتشكلا من دون الماء السائل- ما يدل على أن المذنبات يجب أن تكون أدفأ في بدايتها، ومن ثم يجب أن تكون قد تشكلت بالقرب من الشمس. كما أظهرت النتائج أن تركيب المذنبات والكويكبات ليس مختلفاً دائماً كما توقع العلماء.

فيلم ديب إمباكت Deep Impact ليس فيلماً طموحاً (إن لم يكن مربكاً) فحسب- هو أيضاً اسم مسبار فضائي أرسل مصادماً في العام 2005 إلى مذنب تيمبل 1 (Comet Tempel 1). أُعدّ تصميم المركبة الفضائية لدراسة المذنب من الداخل وتصوير الفوهة الصدمية- على الرغم من أن سحابة الغبار التي صنعها الاصطدام غشَّت على الصور نوعاً ما. واكتشاف المادة البلورية- التي تحتاج لكي تتشكل إلى درجات حرارة أعلى من التي يتعرض لها المذنب- يشير إلى أن هذه المادة إما أنها دخلت المذنب من المنطقة الداخلية في المجموعة الشمسية، وإما أن المذنب تشكل من البداية في منطقة بعيدة عن موقعه الحالي.

غيرَ أن نتائج المسابير الأحدث أكثر إثارة. ففي تطور لافتٍ، أطلقت وكالة الفضاء الأوروبية في العام 2004 مركبة فضائية تسمى روزيتا Rosetta لتستكشف المذنب 67P/تشوريموف-غيرازيمنكو 67P/Churyumov-Gerasimenko ومن ثم ليهبط مسبار يسمى فيلاي Philae على سطح المذنب ليدرس تركيبة الذرات والمنطقة الداخلية من قرب. تصدر فيلاي عناوين الأخبار الرئيسة في نوفمبر العام 2014، حيث هبط- وإن لم يكن بطريقة سلسة كما كان مخططاً له- بارتطامات أرسلته إلى موقع أقل استقراراً. حقق هذا الحدث، الذي كان سلسلة من المغامرات بالمعنى الحرفي للكلمة، قدرا جيداً من أهدافه العلمية. على الرغم من عدم نجاح عملية الحفر، درس فيلاي شكل المذنب وجوه بتفاصيل أكثر من قبل- وإن كان في المكان الخطأ ومن دون وجود الآليات الملحقة المعنية في المكان الملائم.

يدور مسبار روزيتا الآن حول المذنب وسيستمر في ذلك حتى يدخل في المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية. هذه المهمة هي إنجازٌ مذهل- ربما أكثر روعة في ضوء انطلاقها خلال قرن من إطلاق الأخوين رايت مركبتهم الأولى.

مذنبات قصيرة وطويلة الأمد

مع كل هذا التقدم، لا يزال هناك عديد من الأسئلة المثيرة. إضافة إلى تحديد تركيبتها بنحوٍ أفضل، يود علماء الفلك أن يعمقوا معرفتهم بمدار المذنبات وطريقة تشكلها. في الواقع، لا نتوقع بالضرورة تفسيراً واحداً موحداً لأن هناك دليلاً على فئات متباينة من المذنبات، إذ تُصنف إلى فئتين هما المذنبات قصيرة وطويلة الأمد، وذلك بحسب الوقت الذي تستغرقه لإتمام رحلتها حول الشمس. والحد الفاصل بين طويلة الأمد وقصيرة الأمد هو 200 سنة، ولكن تختلف الفترات بوجهٍ عام ما بين بضع سنوات إلى عدة ملايين سنة.

تنشأ المذنبات خلف كوكب نبتون ويقبع مخزون هذه الأجرام الوراء نبتونية Trans-Neptunian objects في حزم مدارية تقع على مسافات مختلفة من الشمس. تدعى المناطق الداخلية، التي تنشأ بداخلها المذنبات قصيرة الأمد، *حزام كايبر Kuiper belt* والقرص المبعثر Scattered disk، في حين تدعى المنطقة الأبعد بسحابة أوورت، التي يفترض أنها تصنع مذنبات طويلة الأمد والتي سأعود إليها (مجازياً) عما قريب. تقع منطقة إضافية يقترحها علماء الفلك، ولكننا لن نركز عليها هنا بين القرص المبعثر وسحابة أوورت ويطلق عليها اسم *الأجرام المنفصلة Detached objects*.

إلى حد كبير يتداخل تصنيف المناطق الداخلية والخارجية التي تنشأ فيها المذنبات مع فتراتها المدارية Orbital period. غالباً ما تكون المذنبات التي نراها قصيرة الأمد، مثل مذنب هالي، الذي يتكرر في فترات معقولة والذي راقبه أجيال من البشر. تأتي المذنبات قصيرة الأمد من مناطق أقرب في حين تصل أغلب المذنبات

طويلة الأمد من مناطق أبعد. وقليلاً ما نرى مذنبات طويلة الأمد أيضاً، وفقط إذا دخلت المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية، والذي قد يكون سببه اضطرابات في سحابة أوورت البعيدة. تؤثر جاذبية الشمس في المذنبات هناك تأثيرا ضعيفاً بحيث إن أقل الاضطرابات يمكنها أن ترسل الأجرام خارج مدارها، لتغوص إلى الداخل نحو الشمس. حتى المذنبات قصيرة الأمد، مثل مذنب هالي، يمكن أن تكون قد أرسلت خارج مدار بعيد طويل الأمد إلى مدار قصير الأمد في المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية.

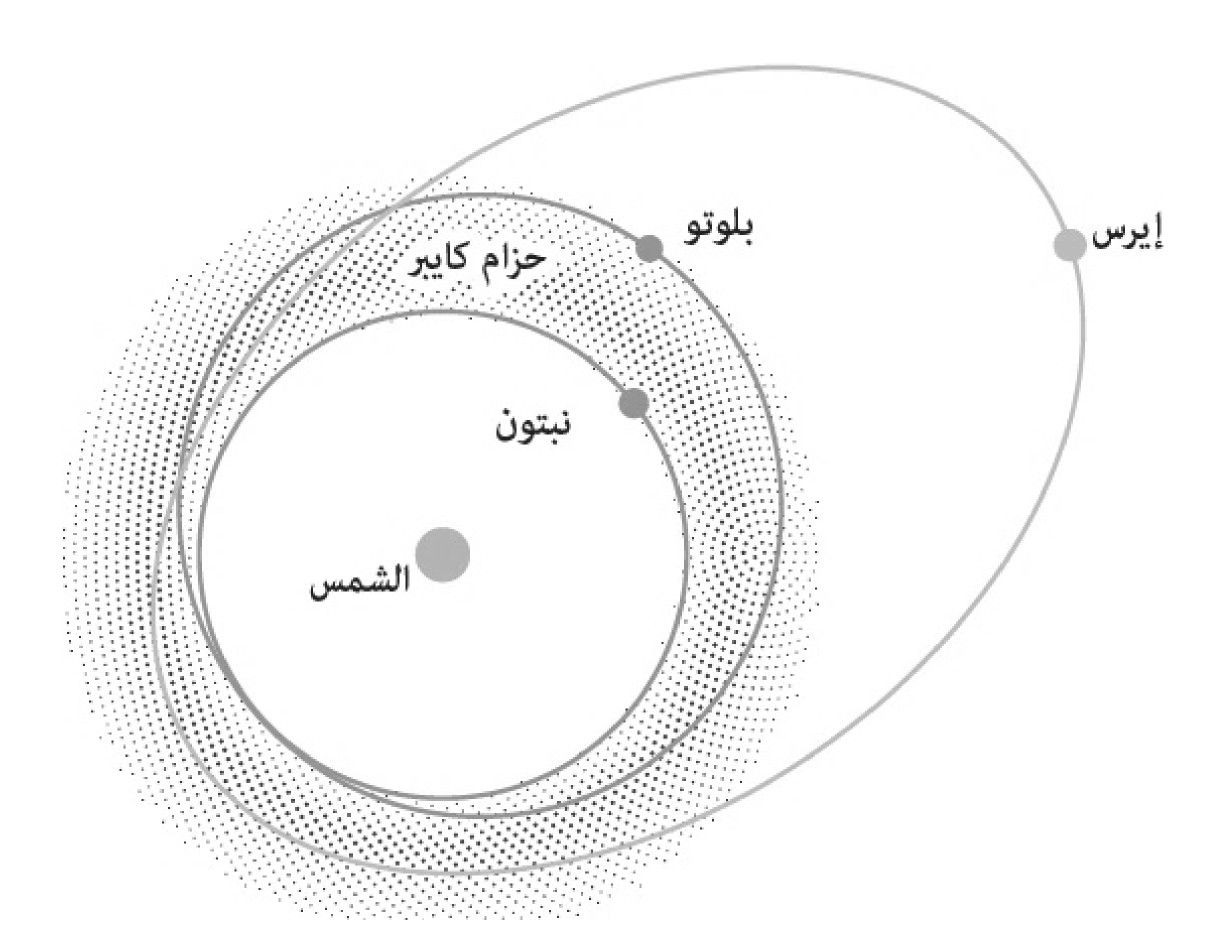
تصنف المذنبات قصيرة الأمد إلى فئتين فرعيتين: مذنبات عائلة هالي، بفترات أكثر من 20 سنة، ومذنبات عائلة المشتري، بفترات أقصر. من المحتمل أن هناك بعض الكويكبات أو المذنبات الخاملة/الهامدة Dormant/extinct في مدارات قصيرة أيضاً، ولكن ربما كان هناك عدد قليل جداً من الكويكبات التي تفوق فترتها المدارية 20 سنة. المذنبات طويلة الأمد أكثر بعداً عن المركز، بمعنى أن مداراتها لامركزية أكثر من المذنبات قصيرة الأمد. هذا منطقي، لأن المذنبات التي نستطيع رؤيتها هي القريبة من الشمس. في حين أن المذنبات قصيرة الأمد تدور بالقرب من مجال الشمس، يجب أن يكون للمذنب طويل الأمد الذي نستطيع رؤيته مدارٌ ينحسر إلى الداخل بالقرب من الشمس، ولكن يمتد نحو الخارج ليصنع مساراً طويلاً يتطلب وقتاً طويلاً للدوران. يبدو أيضاً أن مدارات المذنبات طويلة الأمد تقع بالقرب من مستوى دائرة الكسوف (مدار الشمس في صفحة سماء الأرض) Ecliptic plane حيث تسافر الكواكب وتدور بالاتجاه العام نفسه.

يعتمد مصير أي من هذه الأجرام التي تدخل المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية على اضطرابات إضافية محتملة. يعد المشتري أكبر جرم مثير للاضطراب نسبياً في المنطقة المحلية لأن كتلته تزيد على ضعف الكتلة الإجمالية للكواكب الأخرى مجتمعة. قد تدخل المذنبات الجديدة في المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية في مدار جديد أو قد تظهر مرة واحدة قبل إن تُدفع إلى خارج المجموعة الشمسية أو قبل أن تصطدم بكوكب، كما حدث بمذنب شوميكر-ليفي Shoemaker-Levy الشهير الذي اصطدم بالمشتري منذ فترة ليست بالبعيدة- في العام 1994.

حزام كايبروالقرص المبعثر

فلننظر الآن إلى المجالات التي تحتوي على أجسام المجموعة الشمسية الجليدية الثانوية التي ستتحول إلى مذنبات إذا ما تعرضت إلى اضطرابات تدفعها إلى دخول المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية. سيكون موضوعنا الأول هو حزام كايبر. (انظر: الشكل 14). على الرغم من أنه ليس بحد ذاته مخزوناً من المذنبات قصيرة الأمد، إلا أنه دليل مهم يشير إلى القرص المبعثر، الذي يعد هو المخزون.

في اعتقادي أن إحدى أكثر السمات إثارة للإعجاب في حزام كايبر، الذي اكتُشِف في أربعينات وخمسينات القرن العشرين، هو حداثة اكتشافه. فلم يكن أبعد بكثير من العام 1992 أن أدرك علماء الفلك أن فهمنا للمجموعة الشمسية- التي تعلمها كثير منا في صفوف الدراسة وظن أنها راسخة- يجب مراجعته نظراً إلى اكتشاف حزام كايبر وعديد من التطورات الأخرى التي سأناقشها قريباً. حتى إن لم تسمع بحزام كايبر من قبل، ربما تكون على إلمام ببعض الأجرام التي فيه أو نشأت منه. يتضمن ذلك ثلاثة كواكب أقزام- من بينها الكوكب السابق المعروف ببلوتو. على الرغم من أنهما يقعان الآن بعيداً عن حزام كايبر، فإن لقمر نبتون تريتون Triton وقمر زحل فيبي Phoebe حجمين وتركيبين يشيران إلى أنهما أيضاً بدآ وجودهما في هذا الموقع قبل أن تسحبها التحولات الكوكبية بعيداً.



[الشكل 14] حزام كايبر يقع خلف نبتون ويشتمل على بلوتو كأكبر أجرامه. في حين يضم القرص المبعثر، الذي يقع خارج حزام كايبر بقليل، على إيرس، الجرم الأضخم.

الوحدة فلكية astronomical unit (اختصارا: الوحدة AU)، هي نحو 150 مليون كيلومتر تقريبا- وهي المسافة التقريبية بين الأرض والشمس. يقع حزام كايبر في منطقة أبعد بثلاثين ضعفاً عن الشمس- في المسافة ما بين نحو 30 و55 وحدة فلكية. وهو يضم عددا كبيرا من الكواكب الثانوية، التي يقع معظمها في حزام كايبر الكلاسيكي، الذي يقع ما بين نحو 42 و48 وحدة فلكية بعيداً عن الشمس. تمتد هذه المنطقة عمودياً نحو 10 درجات خارج مستوى مدار الشمس، على الرغم من أن لمتوسط الموقع فقط بضع درجات من الانحراف. سماكته تجعله أشبه بقرص الدونت أكثر من كونه على شكل الحزام. ومع ذلك، لا يزال اسمه المضلل باقيا.

كما أن الاسم غير منصف لسبب آخر أيضاً. إن كثرة وتنوع التنبؤات السابقة عن طبيعة حزام كايبر يجعلان مِن غير الواضح مَن تحديداً يستحق عزو هذا الاقتراح لنفسه. بُعيد اكتشاف بلوتو في عشرينات القرن العشرين، شك عديد من علماء الفلك في أنه ليس وحده. في ثلاثينات القرن العشرين قدم العلماء فرضيات مختلفة حول أجرام وراء نبتونية، ولكن ربما يستحق عالم الفلك كينيث إيدجورث Kenneth Edgeworth الفضل الأكبر. ففي العام 1943، جادل بأن المادة في المجموعة الشمسية البدائية في المنطقة التي تقع خلف نبتون كانت مبعثرة لدرجة لا يمكن معها نشوء كواكب وأنها ستصبح بدلاً من ذلك مجموعة من الأجسام الأصغر. وتابع تنبُّؤَه قائلا إنه في حال دخل أحد هذه الأجرام المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية فسوف يصبح مذنباً.

يفضل العلماء حاليا سيناريو مشابها لتنبؤ إيدجورث، وهو أن القرص الشمسي البدائي قد انضغط إلى أجرام أصغر من الكواكب، تُدعى أحياناً *الكواكب المصغرة Planetesimals*. قدم جيرارد كايبر Gerard Kuiper، الذي سمي الحزام باسمه، هذه الفرضية– في العام 1951– ومع ذلك لم يكن مصيباً تماماً، إذ اعتقد أنها بنية عابرة ستكون قد اختفت في وقتنا، حيث اعتقد أن بلوتو أكبر مما هو عليه في الواقع، ولذلك سينظف المنطقة المحيطة كما فعلت الكواكب الأخرى. ولكن لأن بلوتو كان أصغر بكثير مما توقع كايبر، لم يحصل ذلك، لذلك بقي حزام كايبر، وأجرامه الكثيرة في المنطقة العامة نفسها حول مدار بلوتو.

يُنسَب الفضل إلى إيدجورث أحياناً إلى جانب كايبر لتنبُّئِه، وذلك باسم حزام إيدجورث-كايبر. ولكن كما يحدث دائماً بالأسماء المطولة– على الأقل في أمريكا– يشيع استخدام الاسم الأقصر. كما هي الحال في "جائزة بنك السويد المركزي في علوم الاقتصاد في ذكرى ألفرد نوبل"، التي كانت فكرة متأخرة عن جوائز نوبل الحقيقية، ولكن يشار إليها عادة بـ"جائزة نوبل في الاقتصاد" أكثر من استخدام الاسم الكامل والمربك، نادراً ما تسمع النسخة الأطول من المصطلح الفلكي الذي يقدر مساهمة إيدجورث القدرَ المناسب.

لاحقاً لاقتراح إيدجورث وكايبر، لاحظ العلماء أن المذنبات بحد ذاتها تدلنا على وجود حزام كايبر. فاكتشفنا كثيراً من المذنبات قصيرة الأمد في سبعينات القرن العشرين التي يمكن نسبها إلى سحابة أوورت– مخزون المذنبات الأبعد الذي سننتقل إليه قريباً. نشأت المذنبات قصيرة الأمد بالقرب من مستوى المجموعة الشمسية، على عكس مذنبات سحابة أوورت، التي توزعت حول الشمس بشكل أكثر دائرية. بالاستناد إلى هذا التقييم، فكر عالم الفلك خوليو فرنانديز Julio Fernandez- من الأوروغواي- أنه يمكن تفسير المذنبات بحزام يقع في المنطقة التي نعرفها الآن على أنها حزام كايبر.

كما هي الحال دائماً، على الرغم من كل هذه التنبؤات، تطلب الاكتشاف الحساسية الضرورية في المراقبة. لأن إيجاد أجرام صغيرة بعيدة وغير ساطعة ليس بالأمر السهل، واكتُشف أول جرم- عدا عن بلوتو- في حزام كايبر فقط في العام 1992 وبداية 1993. إذ رصدت جين لوو Jane Luu وديفيد جويت David Jewitt - اللذان بدآ بحثهما عندما كان جويت أستاذاً في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا وكانت لوو طالبة- مشاهداتهما من مرصد كت بيك الوطني Kitt Peak National Observatory في أريزونا ومرصد كرو تولولو Cerro Tololo Inter-American Observatory في تشيلي. وتابعا أبحاثهما حتى بعد أن انتقل جويت إلى جامعة هاواي، حيث تمكنا من استخدام تلسكوب 2.24 متر على قمة البركان ماونا كيا الخامد الآن– موقع بإطلالة رائعة وسماء صافية ساحرة (يستحق الزيارة إذا ذهبت إلى الجزيرة الكبيرة). بعد خمس سنوات من البحث، اكتشفا جرمين في حزام كايبر– الأول في صيف العام 1992 والآخر في بداية العام التالي. منذئذٍ، اكتُشِف عديدٌ من الأجرام الأخرى، على الرغم من أنها حتماً تمثل جزءاً ضئيلاً مما هو موجود فعلاً. نحن نعلم الآن أن الحزام يحتوي على أكثر من ألف جسم، هي ما تعرف بأجرام حزام كايبر Kuiper belt objects (اختصارا: الأجرام KBO)، على الرغم من أن الحسابات تشير إلى احتمال وجود مئة ألف جرم في قطر يفوق 100 كيلومتر.

تجدر الإشارة إلى أنه على الرغم من فقدان بلوتو منزلتَه بوصفه كوكباً، لا يزال يعد جرما مميزاً، ولهذا السبب اكتُشف قبل أي جرم آخر في حزام كايبر. بالاستناد إلى ما نعرفه عن كتل الأجرام في محيطه، بلوتو أكبر مما يمكن توقعه. يُمثِّل هذا الجرم وحدَه نسبة لا بأس بها من الكتلة الإجمالية لحزام كايبر ومن المرجح جداً أنه أكبر جرم موجود هناك. في الواقع، إن صافي الكتلة المنخفضة لحزام كايبر دليل مثير على أصله. على الرغم من أن التقديرات تتراوح بين نحو 4 و10 في المئة من كتلة الأرض، تخصص نماذج تشكل المجموعة الشمسية نحو 30 ضعفاً من كتلة الأرض لحزام كايبر. إذا كانت كتلته دائماً بهذا الحد المنخفض، لما انضم إلى الحزام أي جرم يتجاوز قطره 100 كيلومتر– ما يتناقض مع وجود بلوتو. يدلنا هذا على أن جزءاً كبيراً– أكثر من 99% من الكتلة المتوقعة– غير موجودة. إما أن أجرام حزام كايبر تشكلت في مكان آخر– أقرب إلى الشمس، أو أن شيئاً ما شتت معظم الكتلة.

تُدعى عديدٌ من الأجرام الأخرى التي لها مدار مشابه لمدار بلوتو بـ *بلوتينوات Plutinos* وهي تقع على بعد أقل من 40 وحدة فلكية عن الشمس بقليل، على الرغم من أن مداراتها اللامركزية تجعل أبعادها تختلف. البلوتينوات هي أجسام حزام كايبر الرنانة Resonant Kuiper-belt objects، وهي التي تسافر في مدارات لها معدل ثابت بالنسبة إلى نيبتون. يدور بلوتو، على سبيل المثال، حول الشمس مرتين خلال الفترة التي يدور فيها نبتون ثلاث دورات. يمنع المعدل الثابت الأجسام من الاقتراب جداً من نبتون، ومن ثم تهرب من مجال جاذبيته الأقوى الذي يمكن أن يدفعها خارج المنطقة. المسلي في الأمر أن يطالب الاتحاد الفلكي الدولي بأن البلوتينوات، مثل بلوتو، تحتاج إلى أن تسمى بأسماء آلهة العالم السفلي. نحن نعلم بوجود ألفٍ على الأقل من هذه الأجرام، ولو أنه، نظراً إلى الاستطلاعات المحدودة حتى اليوم، يشك العلماء– كما حال تصنيفات أخرى ناقشتها– بوجود عدد أكثر بكثير من هذا.

لكن، لا تضم مجموعة أجرام حزام كايبر المسيطرة بلوتينوات، بل أجراما تقع في حزام كايبر الكلاسيكي. وجدت الاستطلاعات عديداً من هذه الأجرام، ومن المرجح جداً أن يجد مشروع مسح بان ستارز Pan-STARRS survey project- الذي يبحث الآن كامل الوقت عن أي شيء يمكن رؤيته يتحرك في المجموعة الشمسية- مزيداً منها. للأجرام في حزام كايبر الكلاسيكي مدارات مستقرة لا يثير نبتون اضطرابها– حتى من دون أي مدار رنيني Resonant orbit يبقيها بعيدة بنحوٍ ثابت. كما أن جزءاً كبيراً من هذه الأجرام الكلاسيكية الأكثر حمرة لها مدارات دائرية. ولكن مجموعة أخرى لها مدارات أكثر لامركزية وأكثر ميلاً– تصل كحد أقصى إلى نحو 30 درجة– ولكن بوجهٍ عام أقل من هذا بكثير. وداخل حزام كايبر تبقى بعض المناطق الأقل كثافة في الأجرام والأقل استقرارا- نسبياً، إذ تحتوي فقط على الأجرام التي تشكلت منذ فترة قصيرة نوعاً ما.

من المرجح أن تكون الأجرام التي سبق أن كانت في حزام كايبر أجراما سلفا لغيرها أو على الأقل مرتبطة بعديد من المذنبات التي نشاهدها، لذا من غير المفاجئ أن يكون تركيبها أساسا هو تركيب المذنبات نفسه. يتكون معظمها من مواد متجمدة مثل الميثان والأمونيا والماء. وسبب وجود الجليد بدل الغاز هو موقع الحزام، ومن ثم درجة الحرارة المنخفضة التي تصل إلى نحو 50 درجة كلفن. أي أبرد بـ 200 درجة من نقطة تجمد الماء. بعد أن ينهي العلماء تحليل البيانات من المركبة الفضائية نيو هورايزون، التي ستكون جمعت كثيراً من المعلومات حول بلوتو وحزام كايبر، سوف نعلم قدراً أكبر بكثير.

المدارات في الحزام مستقرة، لذا فإن المذنبات لا تنشأ تحديداً من هناك. الأجسام الواقعة بنحوٍ دائم في حزام كايبر لن تشق طريقها إلى الشمس. بدلاً من ذلك، تنشأ المذنبات قصيرة الأمد من *القرص المبعثر*– منطقة فارغة نسبياً تحتوي على كواكب صغيرة جليدية تتداخل مع حزام كايبر ولكن تمتد أكثر نحو الشمس– إلى 100 وحدة فلكية أو أكثر. يحتوي القرص المبعثر على أجرام يمكن أن يزعزع نبتون استقرار مداراتها. إن اللامركزية الأكثر، ومجال المواقع، ودرجة الميلان– حتى نحو 30 درجة– هي ما يميز مجموعة القرص المبعثر عن أجرام حزام كايبر، إضافة إلى عدم استقرارها. تتمتع أجرام القرص المبعثر بلامركزية بين متوسطة وعالية، بمعنى أن لها مدارات ممتدة أكثر من كونها دائرية. إن لامركزية المدارات عالية جداً إلى درجة أن الأجرام التي مجالها الأقصى بعيد جداً عن نبتون تقترب بما يكفي أثناء دورانها لتكون عرضة لمجال جاذبية نبتون. لهذا السبب يمكن أن يرسل تأثير نبتون أحياناً أجرام القرص المبعثر إلى المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية، حيث تسخن هناك لتطلق الغاز والغبار، ومن ثم تصبح مذنبات قابلة للرؤية.

يقع إيريس، الكويكب الوحيد المعروف القابل للمقارنة مع حجم بلوتو، خارج حزام كايبر في القرص المبعثر وكان أول ما أمكن التعرف عليه. من أجل العثور عليه، استخدم علماء الفلك في ماونا كيا أجهزة اقتران الشحنة Charge-coupled devices (اختصارا: مستشعر CCD) نسخة متطورة من التقنية المستخدمة في الكاميرات الرقمية– إلى جانب معالجات حاسوبية أفضل. جعلت هذه الأدوات الأجرام الأبعد قابلة للملاحظة وساهمت في اكتشاف إيريس الحديث جداً في العام 1996. وجد علماء الفلك ثلاثة أجرام أخرى في القرص المبعثر بعد ثلاث سنوات. قبل ذلك في العام 1995 اكتشفوا جرما آخر– يدعى بشكل غير شاعري الجرم

(48639) 1995 TL8، ولكن صُنِّف لاحقاً جِرماً ينتمي إلى القرص المبعثر. ومنذ ذلك الحين اكتشف المزيد من المئات منها. يقارب عددها الإجمالي ربما عدد أجرام حزام كايبر، ولكن لكونها أبعد يصعب رصدها.

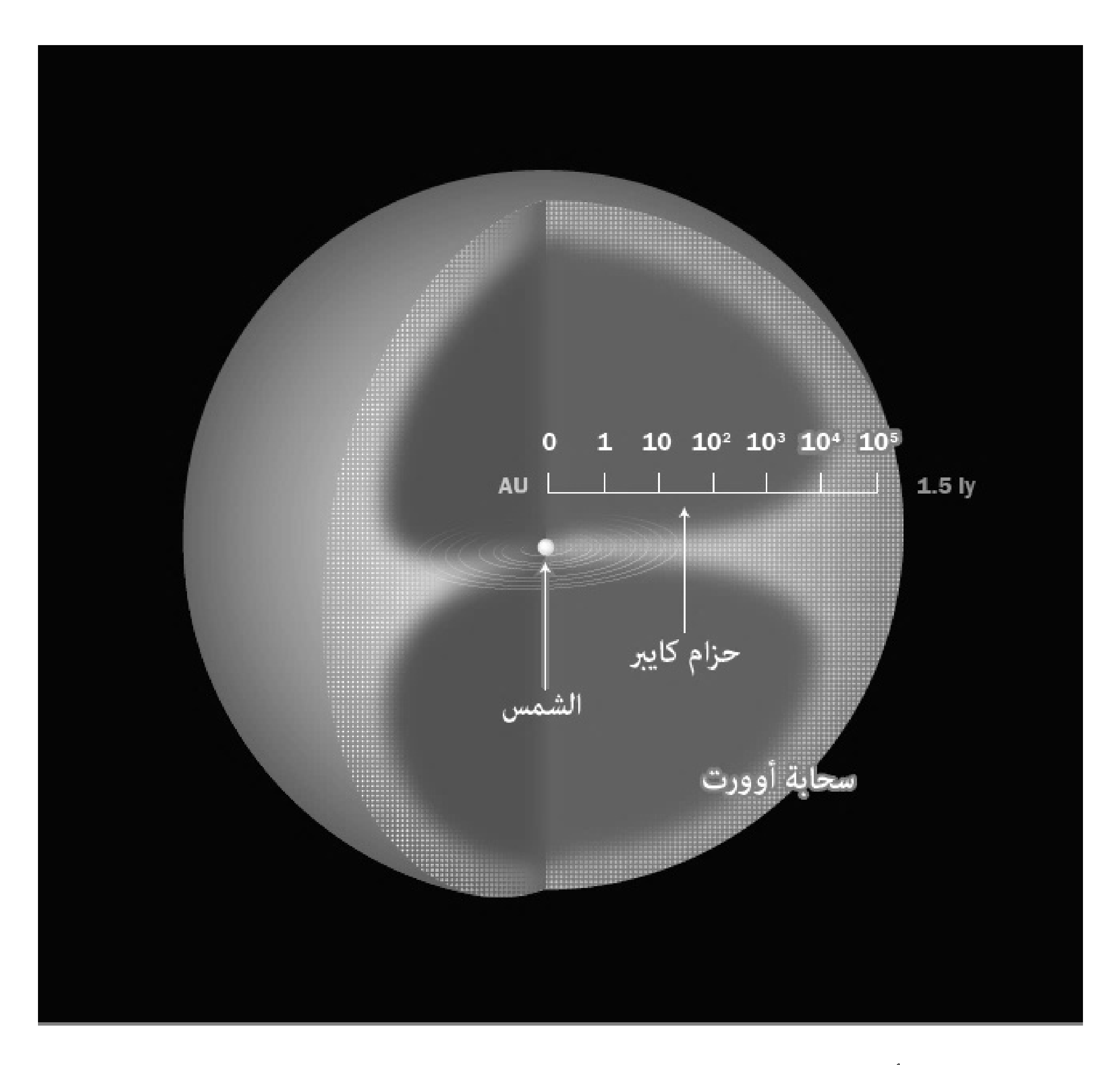
تحتوي أجرام حزام كايبر والقرص المبعثر على مركبات متشابهة. مثل الأجرام الوراء نبتونية الأخرى، للأجرام في القرص المبعثر كثافةٌ منخفضة، وتتألف بنحوٍ رئيس من مواد متطايرة متجمدة مثل الماء والميثان. يعتقد كثيرون أن أجرام حزام كايبر وأجرام القرص المبعثر بدأت من المنطقة نفسها، ولكن تفاعلات الجاذبية- مع نبتون بنحوٍ رئيس- أرسلت بعضها إلى مدارات مستقرة في حزام كايبر، وأرسلت غيرها نحو الداخل إلى منطقة تحتوي على أجرام تدعى القنطور Centaurs التي تقع بين مداري المشتري ونبتون. أرسلت التفاعلات التجاذبية الأجرام الباقية إلى مدارات غير مستقرة في القرص المبعثر.

من شبه المؤكد أن تأثير جاذبية الكواكب الخارجية Outer planets هي المسؤولة عن معظم بنية حزام كايبر والقرص المبعثر. يبدو أنه في مرحلة ما انجرف المشتري نحو الداخل، باتجاه مركز المجموعة الشمسية، في حين تحرك زحل وأورانوس ونبتون نحو الخارج. استخدم المشتري وزحل كلٌّ منهما الآخر ليحفظا استقرار مداريهما- يدور المشتري حول الشمس في مدة زمنية هي ضعف فترة دوران زحل تماماً، ولكن هذين الكوكبين زعزعا استقرار أورانوس ونبتون- حيث وضعاهما في مدارات مختلفة، وأصبح مدار نبتون أكثر لامركزية ويدور باتجاه الخارج أكثر. في طريقه إلى مقره الأخير يرجح أن نبتون بعثر كثيراً من الكواكب المصغرة إلى مدارات لامركزية أكثر وأرسل غيرها إلى مدارات داخلية حيث إما ستتبعثر من جديد وإما سيدفعها تأثير المشتري. كل هذا سيترك أقل من واحد في المئة من حزام كايبر متماسكاً، في حين ستتبعثر الأغلبية.

هناك اقتراح منافس هو أن حزام كايبر تشكل أولاً وجاءت الأجرام المبعثرة من حزام كايبر. في هذا الاقتراح- المشابه في عديد من النواحي للاقتراح السابق- بعثر نبتون والكواكب الخارجية بعض الأجرام إلى مدارات مائلة لامركزية، إما نحو المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية، وإما نحو الخارج إلى الأطراف البعيدة من المجموعة الشمسية. ستصبح بعض الأجرام المبعثرة من حزام كايبر نحو الخارج أجرام القرص المبعثر. بينما قد تصبح أخرى أجرام القنطور (القناطير Centaur نوع من الكواكب الصغيرة لها مدارات غير مستقرة وتتشارك خصائص كل من الكويكبات والمذنبات). يمكن لهذا الاقتراح أن يحل لغز كيف يمكن للقنطور، الذي له مدار غير مستقر ويمكنه أن يبقى ضمن مجاله لعدة ملايين سنة فقط، أن يبقى موجوداً حتى هذا اليوم- من الممكن لحزام كايبر أن يعيد تخزينها. للمذنبات أيضاً عمر محدد (ولكن مجيد). حيث تحُتُّها حرارة الشمس تدريجياً من خلال تبخير أسطحها المتطايرة. من دون مصدر مستمر للأجرام الجديدة، لن تستمر المذنبات في الوجود.

سحابة أوورت

القرص المبعثر هو مخزون المذنبات قصيرة الأمد. أما سحابة أوورت، التي هي "سحابة" هائلة منتشرة بشكل كروي تتألف من كواكب مصغرة متجمدة تحتوي ربما على ترليون كوكب صغير، فيفترض أنها مصدر المذنبات طويلة الأمد. (انظر: الشكل 15). أُطلق على سحابة أوورت اسمُها نسبة إلى عالم الفلك الألماني يان هيندريك أوورت، الذي تنسب إليه عديد من الإنجازات المهمة- مع مصطلحين على الأقل في الفيزياء يحملان اسمه. أحد أهم إنجازات أوورت هي طريقة قياس كمية المادة في المجرة بالرصد المباشر، بما فيها المادة المعتمة.



[الشكل 15] تقع سحابة أوورت في المنطقة البعيدة من المجموعة الشمسية، والتي ربما تمتد من 1,000 وحدة فلكية إلى ما يتجاوز 50,000 وحدة فلكية، خارج مجال الكواكب وحزام كايبر.

أوورت أيضاً هو صاحب التنبؤ بما يدعى اليوم سحابة أوورت. في ثلاثينات القرن العشرين، كان عالم الفلك الإستوني إرنست يوليوس أوبيك Julius.pik هو أول من اقترح وجود مثل هذه السحابة كمكان لنشوء المذنبات طويلة الأمد. مع حلول العام 1950، امتلك أوورت الأسباب النظرية والتجريبية للتنبؤ بوجود مثل هذه السحابة الكروية من الأجرام شديدة البعد. أولاً، لاحظ أن المذنبات طويلة الأمد التي كانت تأتي من جميع الاتجاهات لها مدارات واسعة جداً، مما يدل على منشأ أبعد بكثير من حزام كايبر. كما أدرك أوورت أيضاً أن مدارات المذنبات لا يمكن لها أن تبقى طويلاً بما يكفي لكي نلاحظها حاليا لو كانت دائماً في مساراتها الحالية. مدارات المذنبات غير مستقرة، لذلك فإن الاضطرابات الكوكبية تجعلها في المُحصلة تتصادم مع الشمس أو مع كوكب أو أن تدفعها إلى خارج المجموعة الشمسية برمتها. علاوة على ذلك، "ينفد بخار" المذنبات في أثناء مرورها بمحاذاة الشمس عدة مرات– لا يمكن أن يستمر نفاد الغاز قبل أن تختفي الأجرام. كانت فرضية أوورت هو أن ما ندعوه حاليا سحابة أوورت تجدد مؤونة المذنبات الناشئة بحيث يمكن اليوم رؤية مذنبات جديدة.

إن البعد المقترح لسحابة أوورت هائل. بُعد الأرض عن الشمس هو 1 وحدة فلكية، وبُعد نبتون- أبعد كوكب عن الشمس- هو 30 وحدة فلكية. يعتقد علماء الفلك أن سحابة أوورت تمتد ما بين نحو 1,000 وحدة

فلكية عن الشمس إلى مسافات أبعد من 50,000 وحدة فلكية– أبعد بكثير من أي شيء فكرنا فيه حتى الآن. تصل سحابة أوورت إلى جزء جيد من المسافة بين الشمس وأقرب نجم، بروكسيما سنتوري Proxima Centauri– نحو 270,000 وحدة فلكية (أو 4.2 سنة ضوئية). يستغرق الضوء من سحابة أوورت نحو سنة كاملة كي يصل إلينا.

تفسر الطاقة الجاذبية الضعيفة للأجرام في الحافة البعيدة من المجموعة الشمسية سبب كونها عرضة لاضطرابات جاذبية صغيرة يمكن أن تنشئ المذنبات التي نراها. يمكن لدفعة صغيرة أن تخرجها خارج مدارها إلى المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية، مما ينشئ المذنبات طويلة الأمد. قد تؤدي اضطرابات هذه الأجرام ذات الارتباط الضعيف إلى مذنبات قصيرة المدى أيضاً عندما يحول كوكب مساراتها الداخلية. لذلك ربما كانت سحابة أوورت مسؤولة عن جميع المذنبات طويلة الأمد– مثل مذنب هيل-بوب Comet Hale-Bopp المرصود حديثاً– وأيضاً بعض المذنبات قصيرة الأمد– وربما يكون مذنب هالي من بينها. فضلاً عن ذلك، على الرغم من أن معظم مذنبات عائلة المشتري قصيرة الأمد تأتي ربما من القرص المبعثر، ونسب نظائر الكربون والنتروجين في بعضها تشبه ما يوجد في المذنبات طويلة الأمد من سحابة أوورت، مما يشير إلى نشوئها هناك أيضاً. الإمكانية الأخيرة– والأكثر زعزعة– هي أن الأجرام التي اضطربت من سحابة أوورت يمكنها أن تدخل المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية وأن تصطدم بكوكب– من الممكن الأرض– لتولد ضربة مذنب Comet strike. سأعود لاحقاً إلى هذه الإمكانية المثيرة.

تفصح المذنبات طويلة الأمد عن دليل على طبيعة عناصر سحابة أوورت. مثل المذنبات الأخرى، تحتوي على الماء والميثان والإيثان وأول أكسيد الكربون. ولكن قد تكون بعض العناصر في سحابة أوورت صخرية– أشبه بالكويكبات في تركيبتها. على الرغم من أنها تدعى "سحابة"، يبدو أن مخزون المذنبات له بنية، يتكون من منطقة داخلية أشبه بشكل الدونت– تسمى أحياناً سحابة هيلز Hills cloud تكريما للعالم جيه. جي. هيلز J. G. Hills، الذي اقترح منطقة داخلية منفصلة في العام 1981– وسحابة خارجية كروية من نواة مذنبية في المنطقة الأخرى، التي تمتد خارجاً إلى مسافات أبعد بكثير.

على الرغم من الحجم الهائل، قد تكون الكتلة الإجمالية الخارجية لسحابة أوورت أكبر بخمسة أضعاف فقط من كتلة الأرض. ولكنها في الغالب تحتوي على بلايين الأجرام منخفضة الكتلة الأكبر من 200 كيلومتر عرضاً وعلى تريليونات الأجرام الأكبر من كيلومتر واحد. تشير النمذجات الحاسوبية إلى أن المنطقة الداخلية، التي تمتد إلى نحو 20,000 وحدة فلكية، قد تحتوي على أضعاف هذا العدد. قد تكون هذه السحابة الداخلية مصدر الأجرام التي تحل محل تلك التي فقدت من المنطقة الخارجية الأضعف لسحابة أوورت، والتي من دونها لما بقيت السحابة.

لأن سحابة أوورت شديدة البعد، ليست لدينا القدرة على رؤية أجسامها الجليدية في موقعها الأصلي. إن رصدَ أجسام بعيدة وصغيرة تعكس القليل من الضوء من الأطراف البعيدة في المجموعة الشمسية عمليةٌ صعبةٌ جداً. أما الأجرام التي تقع على بعد مسافات شاسعة في سحابة أوورت– الأبعد عن الشمس من حزام كايبر بألف مرة– فيستحيل رصدها حالياً. لذلك فإن سحابة أوورت افتراضيةٌ بحيث لم يرصد أحد قط بنيتها أو الأجرام التي تحتويها. مع ذلك، تعد سحابة أوورت عنصراً متأصلاً في المجموعة الشمسية. إذ تشير مسارات المذنبات طويلة الأمد– القادمة من جميع الاتجاهات في السماء– بشكل مقنع إلى وجودها وإلى أن أصل المذنبات ينبع في هذه المنطقة النائية.

لعل سحابة أوورت نشأت من القرص الكوكبي الأولي Protoplanetary disk، الذي مهد لنشوء معظم البنى في المجموعة الشمسية. ربما ساهمت في تشكل سحابة أوورت اصطدامات المذنبات، والمد والجزر المجرّيين، والتفاعلات مع النجوم الأخرى– خاصة في الماضي عندما كانت هذه التفاعلات أكثر تكراراً- من المفترض. ربما تحركت الأجرام التي تشكلت بالقرب من الشمس في مجموعة شمسية متحركة بدائية نحو

الخارج بتأثير الكواكب الغازيَّة العملاقة لتخلق سحابة أوورت، أو ربما نشأت السحابة من أجرام غير مستقرة في القرص المبعثر.

حتماً نحن لا نعرف جميع الأجوبة بعد. ولكن في ضوء الرصد والعمل النظري، نحن نتعلم كمّاً كبيراً عن الحافة الخارجية للمجموعة الشمسية. ربما يجب ألَّا نَدهَش لأنه مكان ساحر وديناميكي.

8

حافَّة المجموعة الشمسية

في العام 1977، أطلقت ناسا مسبار فويجر 1 في مهمة تستمر أربع سنوات، وتهدف إلى دراسة كوكبي زحل والمشتري. بعد عدة عقود- فيما هو تجسيد مذهل للإصرار والمثابرة- قطع أكثر من 125 وحدة فلكية بعيداً عن الأرض (وهي تعادل طول معظم النهار الذي تستغرقه الإشارة الضوئية المرسلة لكي تصل إلينا)، يظل فويجر مستمرا في مهمته بثبات. وصلت مركبة فويجر وقياساتها تناولت أطرافاً من الفضاء لم يسبق لأي مهمة أن تصل إليها. وذلك على الرغم من أنه مع الوقت كان يجب تحديث نظام جمع البيانات الذي يستخدم أشرطة من ثمانية مسارات Eight-track tapes، وأنه لم يعد لديها كاميرا فعالة، وأن لمعداتها ذاكرة أقل من ذاكرة الهواتف الذكية حاليا بملايين المرات. ولكن المركبة الفضائية لا تزال قيد العمل وهي حالياً أبعد شيء صنعه الإنسان عن الشمس والأرض.

أصبحت فويجر 1- بغض النظر عن أن معداتها قد تقادمت- موضوعاً مثيراً في أخبار العام 2013، عندما أعلنت ناسا أنه في 25 أغسطس، 2012، دخلت المركبة الفضاء البينجمي. احتد النقاش- حتماً بين المجتمع العلمي، وغيره أيضاً- عندما أعلنت التقارير الإخبارية أن فويجر 1 قد وصلت إلى حافة المجموعة الشمسية. على تويتر كان الحديث مسلياً ولحوحاً بنحوٍ خاص. تبدلت التغريدات الجذلة حول خروج فويجر من المجموعة الشمسية بتغريدات ساخطة تدعو الناس إلى أن يتوقفوا عن قول إن فويجر سيغادر. استغرقني الأمر لحظة، ولكنني سرعان ما أدركت أن الناس لم يعترضوا على تكرار المعلومة، ولكنهم كانوا في الواقع يشككون في صحة مصداقية الخبر. ماذا نقصد تماماً بحافة المجموعة الشمسية؟

لقد سافرنا مجازياً حتى الآن إلى سحابة أوورت- المنطقة المرشحة كحافة المجموعة الشمسية- ولكن لا فويجر ولا أي مركبة فضائية أخرى وصلت إلى القرب من هذه المنطقة النائية. ولأن ارتباط المادة المعتمة-النيزك يعتمد على سحابة أوورت وجوارها، لننتقل بإيجاز إلى مسألة المقصود من القول بأن فويجر قد خرجت. أين حدود المجموعة الشمسية، ولِمَ حدودها صعبة التحديد؟

هل كان فويجر داخلاً أو خارجاً؟

تحيط المجموعة الشمسية بجزء صغير من حجم الكون المرئي، ولكنها مع ذلك ضخمة جدا. بحسب المقاييس المنطقية، إنها تضم سحابة أوورت، التي تمتد إلى 50,000 ضعف المسافة بين الأرض والشمس على الأقل ومن المرجح ضعف هذه المسافة- أبعد من مسافة سنة ضوئية واحدة. لنفهم فكرة مدى بُعد هذه المسافة، فكِّر في المدة التي ستستغرقها مركبة فضائية بالتقنيات الحالية لتصل إلى هذه الأصقاع المترامية. تسافر المركبة الفضائية تقريباً بالسرعة التي تدور بها الأرض حول الشمس، ما يعني أنها تصل إلى مسافة تساوي محيط مدار الأرض في سنة. بحسب هذا التقدير، ستستغرق ثمانية أو تسعة آلاف سنة لتصل إلى 50,000 وحدة

فلكية، وهو خُمس المسافة إلى أقرب نجم بعد المجموعة الشمسية، ولكن ما حجم المجموعة الشمسية من حيث الوحدات الفلكية تحديداً؟

التعريفان السائدان الآخران يعطيان إجابات مختلفة، وتَنتُج عن التعريف الثاني وحدَه نتائجُ مبهمة، وذلك وفقا لطريقة تحديده للحجم. في التعريف الأول، المجموعة الشمسية هي حدود المنطقة التي يسيطر فيها جهد جاذبية الشمس Gravitational potential على تأثيرات الجاذبية الخارج-شمسية Extra-solar gravitational. بحسب هذا التعريف الذي يشير إلى قوة جاذبية الشمس، فويجر لا تزال داخل المجموعة الشمسية. حقيقةً، لأن سحابة أوورت تُعتبَر جزءاً من المجموعة الشمسية، فمن الصعب تقبل أن فويجر لم تعد ضمن جوارنا النجمي، وهي التي لم تدخل حتى إلى سحابة أوورت بعد، وبحسب التقديرات الحالية لن تصل إلى هناك قبل نحو 300 سنة على الأقل، ولن تخرج منها ربما قبل 30,000 سنة.

لكن، لأن من الصعب تحديد مكان انتهاء حدود قوة جاذبية الشمس، فإن هذا التعريف تعريفٌ مبهم. غيرَ أن هناك تعريفاً آخر يتوافق مع دخول الفضاء البينجمي، وهو التعريف الذي يحدد موضع انتهاء المجال المغناطيسي للرياح الشمسية– على بعد نحو 15 بليون كيلومتر، أو نحو 100 وحدة فلكية. وهذا بعيد جداً بحيث إن الإشارات اللاسلكية المرسلة تستغرق نحو اليوم لتصل إلينا. ولكنه أقرب بقليل من سحابة أوورت.

تتألف الرياح الشمسية التي تحدثنا عنها في الفصل الماضي من جسيمات مشحونة– إلكترونات وبروتونات– تبثّها الشمس. لهذه الجسيمات مجالٌ مغناطيسي يندفع خارجاً نحو الفضاء البينجمي بسرعة 400 كم/ث. والفضاء البينجمي تعريفا هو المنطقة بين النجوم، ولكنها ليست خاوية. بل تحتوي على غاز هيدروجين بارد، وغبار، وغاز مؤيّن، وبعض المواد الأخرى من نجوم منفجرة والرياح النجمية لنجوم غير الشمس. وفي النهاية تتلامس الرياح الشمسية مع الوسط البينجمي. فتخلق تلك المنطقة تجويفاً يُدعى الغلاف الشمسي Heliosphere، وتدعى الحدود بين المنطقتين حافَّةَ الغلاف الشمسي Heliopause. ولما كانت المجموعة الشمسية تتحرك، فإن شكل هذه الحدود هو أشبه بشكل الدمعة أكثر منه بالكرة.

يَعتبر بعض العلماء أن حافة الغلاف الشمسي هي الحدود بين المجموعة الشمسية والفضاء البينجمي. والدليل على أن فويجر وصلت إلى حافة الغلاف الشمسي ودخلت الفضاء الخارجي هو اكتشافها تناقُصَ الجسيمات المشحونة من داخل الغلاف الشمسي وزيادة الجسيمات من الخارج. ويمكن التمييز بين الجسيمات لأن لها طاقات مختلفة، بجسيمات مشحونة بطاقة عالية ناشئة من الأشعة الكونية الآتية من سوبرنوفات بعيدة خارج المجموعة الشمسية. في أغسطس 2012، أظهرت بيانات فويجر زيادة حادة في أعداد هذه الجسيمات. وكان هناك أيضاً انخفاض واضح في استشعار الجسيمات منخفضة الطاقة. بما أن هذه تنشأ من الشمس والجسيمات ذات الطاقة الأعلى تأتي من الوسط البينجمي، كان كلا القياسين دليلاً قوياً على أن المسبار قد اجتاز حدود الغلاف الشمسي.

لكن، المعيار الأصلي في تحديد حافة الغلاف الشمسي يشتمل أيضاً على مُتطلَّب أن حدوثِ تغيُّر في قوة واتجاه المجال المغناطيسي، ليتطابق مع المجال خارج الغلاف الشمسي. إلا أن هذا التعريف ليس ثابتاً مع مرور الوقت، ولكنه يعتمد على "طقس" الشمس– أي ما تفعله الرياح الشمسية في لحظة معينة. وتبين أنه على الرغم من أن خواص بلازما الجسيمات المشحونة التي قِيستْ ظلّت ثابتة حتى عند مغادرة المجموعة الشمسية، غير أنها لم تكن تتوافق مع المعيار الأكثر تقييداً المعتمد على المجال المغناطيسي. إذ لم يُرصد أي تغير في المجال المغناطيسي.

لذا على الرغم من أن التغير في بيئة البلازما حصل في 25 أغسطس 2012، لكن حتى تاريخ مارس 2013 ظل السؤال حول ما إذا دخلت فويجر 1 الفضاء البينجمي سؤالا مثيرا للجدل. مع ذلك، في 12 سبتمبر 2013، أعلنت ناسا أنه دخل فعلاً. في النهاية قرر العلماء أن التغير في المجال المغناطيسي لم يكن مُتطلّبا أساسيا. وقرروا

أن يوافقوا على معيار أقل تقييداً، والذي هو: ازدياد كثافة الإلكترونات بعامل يعادل 100 ضعف، وهو متوقع بمجرد اجتياز حافة الغلاف الشمسي.

لذا بحسب التعريف الأول- المُعرَّف بقوة جاذبية الشمس- لا تزال فويجر داخل المجموعة الشمسية وستبقى كذلك وقتاً ما. ومع ذلك، ووفقا للتعريف الثاني (المُعدَّل حديثاً)، دخلت فويجر الفضاء بين الكوني. يبدو أن الإجابة عمّا إذا كانت المركبة فويجر غادرت المجموعة الشمسية أو لا تعتمد على أي التعريفين نستخدم.

كملحق مسلٍّ، تحمل فويجر 1 قرصاً صوتياً وبصرياً فيه معلومات عن المجتمع الإنساني في حال التقطه مخلوق فضائي. أعتقد أن أياً مما قد يضعه أي شخص على قرص مثل هذا هو أمر اعتباطي، ولكن في هذه الحالة يحتوي على تحية باللغة الإنكليزية من جيمي كارتر، الذي كان رئيساً للولايات المتحدة في فترة إطلاق المركبة، وتحية بتسع وأربعين لغة أخرى، وأصوات الحيتان، وأغنية تشاك بيري Chuck Berry "جوني. بي. غوود" Johnny B. Goode. (وقد حضر تشاك بيري إطلاق المركبة). أجد فكرة أن حضارة مخلوقات فضائية، عدا حضارتنا، ستكون قادرة على تشغيل هذا التسجيل بسهولة بعد بضعة مئات السنين، فكرة غير محتملة، كذلك هي فكرة أن أحجامهم تقارب حجمنا، أو أنهم يستخدمون معدات التسجيل الضرورية- بل وسيواجه معظمنا على كوكب الأرض صعوبة في العثور على هذه المعدات مع مرور الوقت. ولن أبدأ بمشكلة الترجمة أو مدى الأصوات التي من المحتمل أن يسمعوها في حال وقعت هذه المصادفة غير المرجَّحة. ولكني أعتقد أنه من المفيد أن نصبو إلى الأمام. قد تكون لهذا القرص الذهبي نتيجة إيجابية واحدة. لقد كان السبب في تعاون آني درويان Annie Druyan، التي كانت مخرجة القرص المبدعة، مع كارل ساغان Carl Sagan. حتى وإن لم تفك الحياةُ الفضائية المحتملة رموزَه، وقد قاد هذا القرص إلى قصة حب رائعة.

سأترك الزوار الفضائيين جانباً حالياً، وألتفت إلى التركيز على الاصطدامات من الفضاء الخارجي والتي نحن متأكدون منها تماماً- النيازك التي ضربت الأرض أو على الأقل دخلت غلافنا الجوي. حتى إن لم يكن أحد سيتمكن من الوصول إلى سحابة أوورت قريباً، فإن أجساما صغيرة من المجموعة الشمسية- احتمال من سحابة أوورت- ستهبط على الأرض بالتأكيد.

9

العيش في خطر

اغتنمتُ فرصة إجازة الربيع في هارفارد أخيراً لزيارة أصدقائي في كولورادو ولأداء بعض الأعمال والتزلج هناك. الجبال الصخرية مكان رائع للتفكير والتأمل، والليالي ملهمة بنحوٍ آسر، والنهار كذلك. في الليالي الصافية الجافة تشع السماء بنقاط لامعة مرقطة بشكل متقطع "بشهب"– تلك النيازك الصغيرة القديمة التي تتداعى في السماء. ذات ليلة وقفت أنا وصديقي خارج المنزل حيث كنت أقيم، متسمرة من الامتداد الآسر للأجرام المضيئة المصطفة بكثافة على صفحة السماء. كنت قد رأيت شهابين قبل أن نلاحظ أنا وصديقي شهاباً كبيراً استمر بضعَ ثوان.

على الرغم من أنني عالمة فيزياء، أشعر بالسرور عادة من مثل هذا المشهد الأخاذ فأتوقف عن الدراسة وأستمتع بالمشهد ببساطة. ولكني في هذه المرة، فكرت في ماهية هذا الجرم وما يمكن أن يمثل مساره. توهّج الشهابُ– ذروة قصة دامت أربعة بلايين ونصف بليون سنة- عدة ثوانٍ، موحياً بأن النيزك المشاهد قد سافر ربما خمسين أو مئة كيلومتر قبل أن يتبخر ويتلاشى. ربما كان النيزك على المسافة نفسها فوقنا، ولهذا السبب رأيناه يعبر مسارا كقوس كبير في السماء. وكان شيئا من الجمال، وشيئاً يمكننا أن نفهمه بنحوٍ جزئي على الأقل. وعندما علقت على هذا الجرم الذي بحجم ذرة الغبار أو الحصى والذي كان من الرائع مشاهدته وهو يرسم خطا عبر السماء، عبَّر صديقي- الذي لم تكن عالما- عن دهشته قائلا إنه تخيل أن يكون عرض الجرم ميلاً على الأقل.

انحرف الحديث بسرعة من التأمل الهادئ للسماء المدهشة إلى التفكير في الضرر الذي يمكن أن يسببه جرم بطول ميل مقبلٍ إلى الأرض. إن احتمال ضرب مثل هذا الجرم الخَطِر الأرضَ ضئيل، واحتمال أن يضرب أيُّ جرم من أي حجم كبيرٍ منطقة مأهولة حيث يمكنه أن يؤدي إلى ضرر جسيم هو احتمال أقل أيضاً. ومع ذلك تخبرنا استقراءات من سطح القمر (لأن فوهات الاصطدام التي بقيت على الأرض أقل بكثير من أن تقدم لنا دليلاً مفيداً) أن ملايين الأجرام بحجم أكبر من 1 كيلومتر وتتراوح حتى نحو ألف كيلومتر عرضاً قد ضربت الأرض خلال حياتها. ولكن معظم هذه الاصطدامات حصلت قبل بلايين السنين في أثناء الكارثة القمرية (القصف الثقيل المتأخر) Late Heavy Bombardment التي، على الرغم من اسمها، حدثت بُعيد تشكل المجموعة الشمسية، وقبل أن تستقر في حالتها المستقرة تقريباً.

ولما كان استقرار الأرض مهما لاستمرار الحياة، فإن معدل ضرب النيازك كان قد أصبح أقل بكثير، وذلك منذ انتهاء الكارثة القمرية. حتى الاصطدام الحديث في سيبيريا الذي التقطته الكاميرات والفيديوهات على اليوتيوب– نيزك تشيليابينسك الذي احترق متوهجا في صدر السماء– كان بعرض عشرين متراً فقط. كان حدثُ العام 1994 هو الواقعةَ الوحيدة الحديثة لجرم بحجم ما رآه صديقي، عندما اصطدمت أجزاء بحجم 9 أميال من مذنب شوميكر-ليفي Comet Shoemaker-Levy 9 بالمشتري. كان الجرم الأولي أكبر من ذلك– ربما بعرض بضعة أميال قبل أن يتحطم إلى أجزاء. إحدى الدلالات على الضرر الذي يمكن أن تسببه أجزاء بعرض ميل واحد كانت سحابة سوداء بحجم كوكب الأرض تمكنا من رؤيتها طافية فوق سطح المشتري. إن حجم 20 متراً كبير بما يكفي، ولكن عرضا يصل إلى ميل واحد هو أمر آخر تماما.

تذكر أن قصة النيازك لا تدور حول الدمار فقط. بل ربما جاء بعض الخير من النيازك Meteoroids والنيازك الدقيقة Micrometeoroids العديدة التي هطلت على الأرض. فربما كانت الأحجار النيزكية Meteorites– بقايا أجزاء من النيازك الساقطة على الأرض– مصدرا للأحماض الأمينية الضرورية للحياة ولمائها أيضاً– وهو مكون أساسي آخر للوجود كما نعرفه. ومن المؤكد أن معظم المعادن التي ننقِّب عنها هنا جاءت

من اصطدامات خارجية. ويمكن للمرء أن يجادل بأن البشر ما كانوا ليظهروا لولا الازدياد المتسارع في هيمنة الثدييات الذي حدث بعد أن قتل اصطدام نيزكي الديناصورات البرية- المزيد حول ذلك في الفصل الثاني عشر، وأُقرّ أنه قد لا يكون أمراً حميداً دائما.

ولكن هذا الانقراض الجماعي قبل 66 مليون سنة هو واحدةٌ من القصص العديدة التي تربط الحياة على الأرض ببقية المجموعة الشمسية. هذا الكتاب هو حول الأشياء المجردة ظاهرياً مثل المادة المعتمة التي أدرسها، ولكنه أيضاً حول علاقة الأرض بمحيطها الكوني. سأبدأ الآن باستكشاف بعض ما نعرفه عن الكويكبات والمذنبات التي ضربت الأرض والعلامات التي خلفتها. وسأتحدث أيضاً عما يمكن أن يضرب الكوكب في المستقبل، وكيف يمكننا أن نصد هؤلاء الضيوف المدمرين المتطفلين.

فجأة من دون إنذار

إن ظاهرة غريبة كسقوط أشياء ما من الفضاء قد لا تصدق. وفي الواقع لم تتقبل المؤسسة العلمية في البداية صحة معظم هذه الادعاءات. وعلى الرغم من أن الناس في الماضي اعتقدوا أن أجراما من السماء قد تصل إلى سطح الأرض- كما كان سكان الأرياف في أوقات لاحقة مقتنعين بذلك أيضاً- إلا أن الطبقات الأكثر ثقافة شكّكت بهذه الفكرة، وذلك حتى وقت لاحق في القرن التاسع عشر. كان الرعاة غير المتعلمين الذين رأوا مثل هذه الأشياء تسقط من السماء يعلمون ما رأوا، ولكن افتقر هؤلاء الشهود إلى المصداقية، لأن الكثير منهم يأتي من خلفيات عرف عنها أنها تتناقل أخبار اكتشافات خيالية. حتى العلماء الذين تقبلوا في النهاية أن أجراما قد سقطت على كوكبنا لم يصدقوا في البداية أن مثل هذه الصخور نشأت أصلاً في الفضاء. بل فضلوا تفسيراً يرتبط بالأرض، مثل هبوط أشياء لفظتها البراكين.

أصبح وصول الأحجار النيزكية من الفضاء الخارجي جزءاً راسخاً في التفكير فقط في يونيو 1794، بعد سقوط حجر نيزكي مصادفة على الأكاديمية في سيينا- حيث شهد الكثير من السياح المثقفين البريطانيين والإيطاليين الحدث مباشرة. بدأت الظاهرة المثيرة بسحابة عالية قاتمة نشرت الدخان والشرارات وبرقٍ أحمر يتحرك ببطء تبعه هطول حجر نيزكي على الأرض. وجد الخوري آمبروغيو سولداني Abbe Ambrogio Soldani في سيينا المواد الهاطلة مثيرة بما يكفي لجمع روايات الشهود وإرسال عينة لكيميائي يعيش في نابولي- غوغليلمو تومسون Guglielmo Thomson- الاسم المستعار لويليام تومسون William Thomson الذي هرب من أوكسفورد بسبب أفعاله المشينة. أشارت دراسة تومسون الدقيقة إلى منشأ خارجي لهذا الجرم، مقدما تفسيراً أكثر ترابطاً مقارنة بالاقتراحات بعيدة الاحتمال المتداولة حينها، والتي تتعلق بمنشأ قمري، أو ببرق يضرب الغبار، أو بالاقتراح الأفضل المنافس والقابل للتصديق بأنه نشأ من بركان فيزوف النشط آنذاك. ربما كان من الممكن الأخذ بعين الاعتبار المنشأ البركاني لو أن فيزوف ثار مصادفة قبل 18 ساعة. ولكن فيزوف يقع على بعد 320 كم وفي الاتجاه الخطأ، لذا استُبعد من احتمالات التفسير.

أخيراً حسم الكيميائي إدوارد هاورد Edward Howard قضية منشأ النيزك بمساعدة الفرنسي النبيل العالم جاك لويس Jacques-Louis وكونت بورنون Comte de Bournon، الذي نُفِيَ إلى لندن أثناء الثورة الفرنسية العام 1800. حلل هاورد والكونت حجراً نيزكياً سقط بالقرب من بيناريس في الهند. واكتشفا كمية من النيكل أكثر مما يمكن توقع وجوده على سطح الأرض، إضافة إلى مواد حجرية ذابت بفعل الضغط العالي. كانت التحاليل الكيميائية التي أجراها تومسون، وهاورد، والكونت هي تحديداً ما اقترحه العالم الألماني إرنست فلورنس فريدريك كلادني Ernst Florens Friedrich Chladni لكي يؤكد فرضيته بأن هذه الأجرام قد ضربت الأرض بسرعة عالية جداً أعلى من أن تكون مترابطة مع التفسيرات المقترحة الأخرى. في الواقع حدث هطول سيينا بعد شهرين فقط من نشر كتاب كلادني، *حول منشأ الكتل الحديدية On the Origin of Ironmasses*،

الذي مع الأسف انتُقِد انتقاداً جادا وقوبل بعدم الاستحسان، وذلك قبل أن تنقل صحيفة برلين أخيراً قصة هطول سيينا بعد سنتين من حدوثها.

كان الكتاب الذي نشره إدوارد كينغ Edward King- زميل الجمعية الملكية Royal Society في إنجلترا- في تلك السنة هو الأكثر قراءة في إنجلترا. استعرض كتاب كينغ أحداث سيينا ومعظم كتاب كلادني أيضاً. وتعزز قبول حالة الأحجار النيزكية في إنجلترا أكثر مع سقوط حجر يزن 56 رطلا في 13 ديسمبر 1795، في وولد كوتج Wold Cottage بيوركشاير. مع أساليب الكيمياء المتقدمة– التي كانت قد استقلت حديثاً فقط عن الخيمياء Alchemy– وبالكثير من الأدلة المباشرة، اعتُرِف أخيراً بماهية الأحجار النيزكية في القرن التاسع عشر. وسقطت العديد من الأجرام من الفضاء الخارجي على الأرض منذ ذلك الحين.

أحداث أحدث

من المؤكد أن عناوين تتناول النيازك والأحجار النيزكية ستثير اهتمامنا. ولكن حتى في أثناء متابعة هذه الأحداث المذهلة، لا ينبغي لنا أن ننسى أننا نعيش حاليا في توازن مع المجموعة الشمسية، ونادراً ما نواجه خللاً خطيراً. جميع النيازك تقريباً صغيرة بما يكفي لتتفكك في الغلاف الجوي العلوي في حين تتبخر معظم موادها الصلبة. وقلما تصلنا أجرام أكبر. ولكن دائماً تزورنا أجرام أصغر. في الغالب تدخل النيازك الدقيقة الغلاف الجوي، وتكون هذه الجسيمات صغيرة جداً إلى درجة أنها لا تحترق. وإن كان بقدرٍ أقل تواتراً، تدخل أجرام بحجم الميليمترات مشارف الأرض بشكل متكرر جداً– ربما مرة كل 30 ثانية– وتحترق من دون أي عواقب تذكر. أما الأجرام الأكبر من نحو 2 أو 3 سنتيمترات جزئياً فتحترق في الجو وقد تصل أجزاء منها إلى الأرض، ولكنها ستكون أصغر من أن تمتلك أهمية.

ولكن كل عدة آلاف سنة، قد يحدث انفجار على ارتفاع منخفض في الجو بسبب جرم كبير. أضخم حدث مُسجّل من هذا النوع وقع في العام 1908 في تونغوسكا بروسيا. حتى من دون أي اصطدام بسطح ما، يمكن لانفجار في الجو أن يؤدي إلى نتائج ملحوظة على الأرض. هذا الكويكب أو المذنب– عادة لا ندري أيهما– انفجر في السماء بالقرب من نهر تونغوسكا في غابات سيبيريا. كانت قوة هذا النيزك المتفجر Bolide– جرم من الفضاء يتفكك في الغلاف الجوي– الذي يبلغ حجمه 50 متراً تكافئ نحو 10 إلى 15 ميغا طن من متفجرات TNT– أضخم من انفجار هيروشيما بألف مرة ولكن ليس أكبر من أكبر قنبلة نووية فُجِّرت. دمر الانفجار 2,000 كم^2 من الغابة وخلف موجة صدمية Shock wave وصلت شدتها إلى 5.0 على مقياس ريختر. ومما تجدر الإشارة إليه أن الأشجار عند ما نكاد نكون واثقين بأنه موقع الارتطام بقيت منتصبة في حين سحقت الأشجار المحيطة بها. كان حجم منطقة الأشجار المنتصبة– ولا توجد فوهة ارتطام– يعني أن الجرم الصادم تفكك على ارتفاع ما بين ستة وعشرة كيلومترات فوق سطح الأرض.

تختلف تقديرات المخاطرة، من ناحية بسبب تباين تقديرات حجم جرم تونغوسكا– الذي تراوح بين ثلاثين وسبعين متراً. وقد يضرب الأرض شيء بهذا الحجم على فترات متقطعة بمعدل مرة كل بضع مئات السنين إلى مرة كل ألفي سنة. مع ذلك معظم النيازك التي تضرب الأرض أو تصل قريبا منها تكون في العادة في مناطق غير مأهولة نسبياً، لأن المراكز السكانية الكثيفة متناثرة.

لم يكن نيزك تونغوسكا استثنائياً من هذه الناحية. فقد انفجر في منطقة غير مأهولة من سيبيريا بحيث كانت أقرب محطة تجارية تبعد سبعين كيلومتراً وأقرب قرية– نزهني-كاريلينسك Nizhne –Karelinsk– كانت أبعد من ذلك. ومع ذلك، كان الانفجار قوياً بما يكفي ليحطم زجاج النوافذ ويطيح بالمارة في هذه القرية البعيدة نسبياً. وأشاح القرويون بأبصارهم بعيدا عن الوميض في السماء. وبعد عشرين سنة من الانفجار عاد

العلماء إلى المنطقة ليعلموا أن بعض الرعاة المحليين شعروا بضوضاء وصدمة، واثنان منهم قُتلا بفعل الاصطدام. كانت النتائج على العالم الحيواني مدمرة، فقد نفق ألف غزال أو أكثر بفعل الحريق الذي أشعله الاصطدام.

أثر الحدث في منطقة أكبر أيضاً. إذ سمع الانفجارَ أهالٍ يعيشون بعيداً بقدر مساحة فرنسا، وتغير الضغط البارومتري على وجه الأرض. طافت الموجة من الانفجار حول الكرة الأرضية ثلاث مرات. في الواقع، العديد من العواقب المدمرة لاصطدام تشيكشولوب الأكبر- أي الاصطدام الذي قتل الديناصورات- والمدروس بنحو أفضل وسأتطرق إليه قريباً- وقعت بعد حادثة تونغوسكا أيضاً: الرياح والنار وتغير المناخ واختفاء نحو نصف طبقة الأوزون في الجو.

مع ذلك، لأن النيزك انفجر في منطقة نائية غير مأهولة وفي مكان وزمان كانت فيهما وسائل الاتصال العامة محدودة، اهتم الناس بالكاد لهذا الانفجار الهائل حتى عدة عقود تالية، عندما كشفت دراسة تالية المدى الكامل للدمار. كانت تونغوسكا نائية، وكانت معزولة أكثر بسبب الحرب العالمية الأولى والثورة الروسية. لو أن الانفجار قد حدث قبل أو بعد ساعة فقط، لربما ضرب مركزاً مأهولاً رئيساً، ولو حدث ذلك لقتلت التأثيرات الجوية أو تسونامي آلاف الأشخاص. ولو حدث ذلك، لما أعاد الاصطدام تشكيل سطح الأرض فحسب، بل وتاريخ القرن العشرين- ربما كان العلم والسياسة سيكشفان بنحو مختلف نتيجة لذلك.

خلال مئة العام التالية لانفجار تونغوسكا وصل إلى الأرض عدة زوار سماويين أصغر حجما، ولكنهم يستحقون الذكر. على الرغم من توثيقه الضعيف، ربما يكون النيزك المتفجر Bolide الذي انفجر في الجو فوق الأمازون في البرازيل العام 1930 من بين أكبرها. كان صافي الطاقة Net energy التي أطلقها أقل من تلك في حادثة تونغوسكا، وتُقدَّر بأنها كانت أكبر بكمية إضافية تتراوح بين 1/100 و ½ ضعف. ومع ذلك كانت كتلة النيزك أكثر من 1,000 طن، بل ومن الممكن أن تكون كبيرة وصولا إلى 25,000 طن- منتجة طاقة بنحو 100 كيلوطن من المتفجرات TNT. وتتباين تقديرات المخاطر، ولكن أجراما بحجم 10 إلى 30 متراً يمكنها أن تضرب الأرض بمعدل يتراوح بين ما يقارب مرة في العقد مرة كل عدة قرون. يعتمد تقدير المعدل بقدر كبير على الحجم المحدد للجرم. يمكن أن يؤدي عدم التيقن من الحجم بمعامل يساوي اثنين إلى تقدير يختلف بما يصل إلى معامل يعادل عشرة أضعاف.

بعد عدة سنوات، انفجر نيزك متفجر bolide بحجم نيزك الأمازون على ارتفاع نحو 15 كيلومتراً فوق إسبانيا، مطلقاً ما يعادل 200 كيلوطن من المتفجرات TNT. كما وقع عدد من الانفجارات خلال الخمسين سنة التالية، على الرغم من أن أياً منها لم يكن كبيراً بحجم حادثة البرازيل، ولن أذكرها جميعها. لكن هناك حادثة جديرة بالذكر هي انفجار فيلا Vela Incident في العام 1979، الذي حدث بين الأطلسي الجنوبي والمحيط الهندي، وقد سمي باسم القمر الاصطناعي الدفاعي للولايات المتحدة الأمريكية الذي رصده. على الرغم من أنه اعتبر في البداية مرشحاً مقبولاً كنيزك، يعزو الناس اليوم سببه إلى انفجار نووي فُجِّر هنا على الأرض.

بالطبع، تلتقط أجهزة الاستشعار Sensors النيازك المتفجرة Bolides الفعلية أيضاً. التقطت أجهزة الاستشعار تحت الحمراء في وزارة الدفاع وأجهزة استشعار الطول الموجي المرئي Visible wavelength sensor التابع لوزارة الطاقة الأمريكية إشارة من نيزك بعرض 5 إلى 15 متراً انفجر في 1 فبراير 1994 فوق المحيط الهادي بالقرب من جزر المارشال. وقد التقطه صيادان على شواطئ كوسراي، ميكرونيسيا، على بعد بضع مئات الكيلومترات من الانفجار. انفجارا آخر أكثر حداثة لجرم بعرض 10 أمتار رُصد في العام 2002 فوق البحر المتوسط بين اليونان وليبيا، مطلقاً طاقة تعادل نحو 25 كيلوطناً من المتفجرات TNT. كما وقع انفجار في 8 أكتوبر 2009 بالقرب من بون، إندونيسيا، الذي نجم ربما عن جرم بقطر نحو 10 أمتار، وأطلق نحو 50 كيلوطناً من الطاقة.

يمكن أن تكون المذنبات والكويكبات الشاردة Errant comets مصدراً للنيازك. من الصعب التنبؤ بمسارات المذنبات البعيدة، ولكن الكويكبات الكبيرة بقدر كافٍ يمكن رصدها قبل أن تصل. كان اصطدام كويكب في السودان العام 2008 مهماً لهذا السبب. ففي 6 أكتوبر من ذلك العام، أجرى العلماء حسابات

أشارت إلى أن كويكباً رصدوه فوراً كان على وشك أن يضرب الأرض في صباح اليوم التالي. وقد حصل ذلك بالفعل. لم يكن اصطداماً مهما ولم يكن هناك أحد في محيطه. ولكنه بيّن أن بعض الاصطدامات يمكن التنبؤ بها، إلا أن طول مدة الرصد قبل الاصطدام يعتمد على حساسية التقاطنا للجرم نسبة إلى سرعته وحجمه.

أحدث الوقائع الجديرة بالذكر هي شهاب تشيليابينسك في 15 فبراير 2013، وهو مطبوع ليس فقط في الصور بل في الذكرى الحية. ولَّد انفجار النيزك المتفجر Bolide هذا على ارتفاع 20 إلى 50 كيلومتراً فوق منطقة جنوب الأورال في روسيا طاقةً تعادل نحو 500 كيلوطن من المتفجرات TNT– امتص الجو معظمها– على الرغم من أن موجة الصدمة Shock wave التي كانت تحمل بعض الطاقة ضربت الأرض بعد عدة دقائق أيضاً. سبَّب الحادثةَ كويكب بعرض نحو 15 إلى 20 متراً وبوزن 13,000 طن وهبط بسرعة تقدر بنحو 18 كم/ث– نحو ستين ضعف سرعة الصوت. لم ير الناس الانفجار فحسب– بل شعروا بحرارة دخوله الغلاف الجوي أيضاً.

أصيب نحو 1,500 شخص بجراح من جراء هذه الحادثة– ولكن غالباً بسبب آثار جانبية مثل تطاير ألواح الزجاج المهشمة. ازداد عدد المصابين بفعل الانفجار لأن الشهود هرعوا إلى النوافذ ليشاهدوا الوميض الساطع– الذي ينتقل بسرعة الضوء– الذي كان أول إشارة بأن شيئاً غريباً يحدث. في انعطاف تعيس للأحداث– مناسب لفيلم رعب جيد– أغرى الضوء في السماء الناسَ بالتوجُّه إلى مواقع خطرة مباشرة قبل تولد موجة الصدمة التي سببت معظم الأضرار.

إضافة إلى الضجة الإعلامية، لحظة اصطدام النيزك، حذرت التقارير الإخبارية من كويكب مختلف بدا أيضاً أنه يقترب من الأرض. تسلل نيزك تشيليابينسك من دون أن يرصده أحد، في حين أن جرما بعرض 30 متر– وهو وصل إلى أقرب نقطة بعد 16 ساعة– لم يصل قط إلى الغلاف الجوي للأرض. خمن كثيرون أن لكلا الكويكبين منشأ مشتركاً، ولكن بحسب دراسات تالية، ربما لم يكن ذلك صحيحاً.

أجرام قريبة من الأرض

مثل الكويكب المُتنبأ به في فبراير 2013، استقطب عدد من الأجرام– التي اقتربت من الأرض من دون أن تدخل غلافها الجوي- كثيراً من الاهتمام. إذ يصل عديد من الأجرام الأخرى إلى الأرض– ولكن الأغلبية الساحقة غير ضارة. ومع ذلك أثرت الاصطدامات الماضية في جيولوجيا وبيولوجيا الكوكب، ومن الممكن أن تؤثر فيه مجدداً في المستقبل. ومع تزايد التنبؤات بوصول الكويكبات والوعي بخطرها المحتمل (ربما المبالغ فيه)، ازداد البحث عن كويكبات يُحتمل أن تتقاطع مع مدار الأرض.

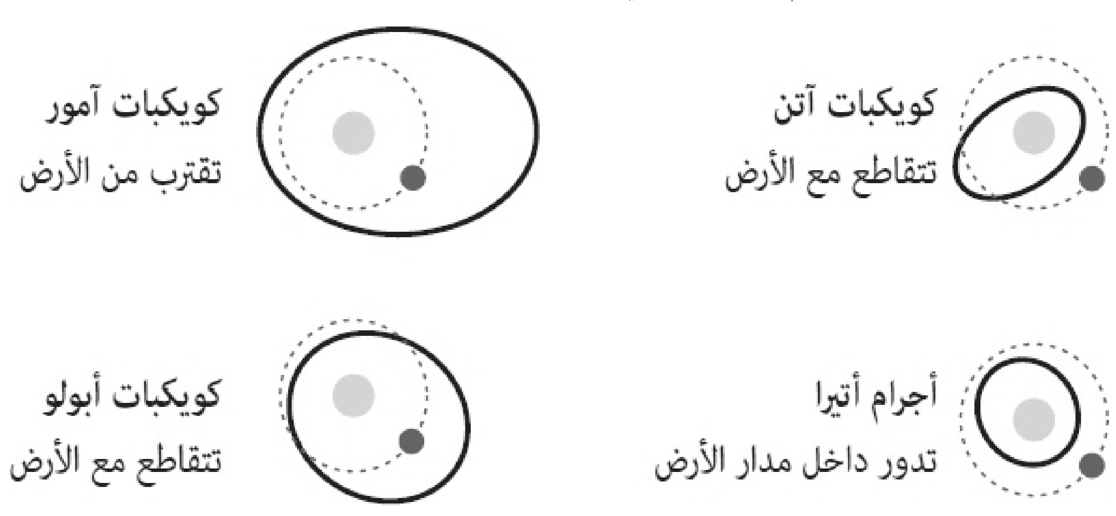
أكثر الاصطدامات تكراراً– وإن لم تكن أكبرها بالضرورة– تأتي مما يعرف بالكويكبات القريبة من الأرض Near-Earth asteroids (اختصارا: الأجسام NEOs)– عناصر تقترب جداً من الأرض، بحيث تكون أقرب نقطة لها إلى الشمس لا تتجاوز 30% من بعد الأرض عن الشمس. وهناك نحو عشرة آلاف كويكب قريب من الأرض، كما يحقق عدد أقل من المذنبات هذا التصنيف، وكذلك بعض النيازك الكبيرة الواقعة على مسارات يمكن رصدها– وتقنياً بعض المركبات الفضائية التي تدور حول الشمس Solar-orbiting spacecraft.

تقسم الكويكبات القريبة من الأرض إلى عدة فئات. (انظر: الشكل 16). تُدعَى الأجسام التي تدخل مجال الأرض أو تقترب منها من دون أن تتقاطع فعلياً مع مدارنا بكويكبات *آمور Amors*– على اسم كويكب العام 1932 الذي وصل إلى 16 مليون كيلومتر، أو 0.11 وحدة فلكية. على الرغم من أنها لا تتقاطع مع مسارنا حالياً، إلا أن الخوف المحتمل هو أن اضطرابات يثيرها المشتري أو المريخ قد تزيد من لامركزية مدارات الأجرام فتتقاطع بالنتيجة مع مدارنا. أما كويكبات *أبولو Apollos*– على اسم أحد الكويكبات– فهي أجرام تتقاطع مع مدار الأرض بمسارات قطرية Radial direction، وعلى الرغم من أنها قد تكون أعلى أو أسفل مدارنا الشمسي–

أي المسار الظاهر للشمس في السماء الذي يشير إلى مستوى مدار الأرض- فإنها عادة لا تتقاطع مع مسار الأرض. ولكن من الممكن أن يتغير المسار مع الوقت- مرة أخرى قد يجعلها هذا تنحرف إلى منطقة خطرة. وهناك فئة أخرى من الكويكبات العابرة للأرض- تتميز عن أجرام أبولو بمجالاتها المدارية Orbital domains، وهي أصغر من مجال الأرض المداري- وتعرف بكويكبات *آتن Atens*. سميت عائلة آتن باسم أحد كويكبات هذا النوع. الفئة الأخيرة من الكويكبات NEAs هي كويكبات آتيرا Atiras- وتقع مجالاتها المدارية بالكامل داخل مجال الأرض. لكن من الصعب العثور عليها، لذا لا نعرف منها إلا القليل فقط.

على المقياس الكوني والجيولوجي لا تدوم الكويكبات NEAs طويلاً. فتبقى عدة ملايين سنة فقط قبل أن تخرج من المجموعة الشمسية، أو تصطدم مع الشمس أو مع كوكب من الكواكب. هذا يعني أنه لوجود كثير منها بالمنطقة القريبة من مدار الأرض، لا بد من إنتاج كويكبات جديدة باستمرار.

معظم الكويكبات NEAs هي كويكبات حجرية Stony asteroids، ولكن هناك عدداً لا بأس به من الكويكبات الكربونية Carbonaceous asteroids التي تحتوي على الكربون أيضاً. الوحيدة التي يفوق عرضها 10 كم هي من نوع آمور- والتي لا تتقاطع مع مسارنا في الوقت الحاضر. لكن هناك عدداً لا بأس به من أجرام أبولو بعرض يتجاوز 5 كم- حتماً كبير بما يكفي ليسبب ضرراً كبيراً في حال تبين أن مساراتها تتقاطع مع مسار الأرض. وأكبر الكويكبات NEA هو غانيميد Ganymed ويبلغ عرضه 32 كم، اسمه هو اللفظ الألماني للأمير الطروادي الذي يُلفَظ بالإنكليزية غانيميد Ganymede. أما غانيميد، أحد أقمار المشتري، فهو جرم مختلف تماماً ولكنه يفوز بمسابقة الحجم لأنه أكبر قمر في المجموعة الشمسية.



[الشكل 16] الفئات الأربع للكويكبات القريبة NAEs من الأرض. يقع مدار كويكبات آمور بين مدار الأرض والمريخ. تتقاطع مسارات كويكبات أبولو وكويكبات آتن مع مسار الأرض، ولكن قد تمتد مساراتها إلى أجزاء خلف مسار الأض لجزء صغير من الفترة المدارية. نصف المحور الرئيس لكويكبات أبولو أكبر من نصف المحور الرئيس للأرض، في حين نصف المحور الرئيسي لكويكبات آتن أصغر من نصف المحور الرئيس للأرض. تقع مدارات كويكبات آتيرا بكاملها داخل مدار الأرض.

شكّلت الكويكبات NAEs مجال بحث جديداً نضج خلال الخمسين سنة الأخيرة. في السابق، لم يأخذ أحد فكرة الاصطدامات على محمل الجد. أما الآن فقد بدأ الناس حول العالم بفهرسة مسارات الكويكبات NAEs قدر الإمكان. حتى خلال زيارتي الأخيرة لجزر الكناري، عندما زرت تلسكوب تينيريف Tenerife telescope، وجدت مدير التلسكوب مع اثني عشر طالبا يفحصون البيانات في محاولة للعثور على الكويكبات NAEs. التلسكوب الصغير القديم ليس أحدث ما هو متوافر، ولكنني كنت معجبة بالطلبة المتحمسين وتقديرهم لأساليب البحث المستخدمة.

حاليا، تبحث تلسكوبات أكثر تطوراً عن الكويكبات باستخدام أجهزة اقتران الشحنات Charge-coupled devices، التي تستعين بأشباه موصلات Semiconductors لتحول الفوتونات إلى إلكترونات مشحونة، تاركة إشارات تحدد الأماكن التي تضربها الفوتونات. كما ساعدت أنظمة للقراءة الآلية Automated readout systems في زيادة معدل الاكتشاف. فالموقع الإلكتروني http://www.minorplanetcenter.net/ لمركز الكواكب الصغرى Minor Planet Center - في مركز هارفارد سميثسونيان Harvard Smithsonian Center for Astrophysics التابع للاتحاد الفلكي الدولي International Astronomical Union- يسرد أعداد الكواكب الصغرى/الثانوية والمذنبات والأجرام القريبة التي عُثِر عليها.

لأسباب واضحة تستحوذ المدارات القريبة من الأرض على أكبر قدر من الاهتمام. فتتعاون الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد الأوروبي على مسح هذه الأجرام في مشروع يدعى سبيس غارد (حارس الفضاء) Spaceguard– اختير اسم المشروع كإطراء لفيلم الخيال العلمي موعد مع راما Rendezvous with Rama لآرثر سي. كلارك Arthur C. Clarke. حدّد تقرير استفتاء مجلس الشيوخ الأمريكي العام 1992 مهمة أول برامج سبيس غارد، والذي استوجب تصنيف أكثر الأجرام القريبة من الأرض التي يصل حجمها إلى أكثر من 1 كم خلال عقد. إن 1 كم حجم كبير– أكبر من أصغر جرم يمكنه أن يلحق الضرر- ولكنه اختير لأن الأجرام بحجم 1 كم يسهل إيجادها، وهي كبيرة بما يكفي لإلحاق ضرر عالمي. من حسن الحظ، معظم الأجرام بحجم 1 كم التي نعرفها تدور بين المريخ والمشتري في حزام الكويكبات. وإلى أن تغير مدارها لتصبح أجراماً قريبة من الأرض، فإنها حتماً لا تشكل أي خطر.

بالاستخدام الدقيق للملاحظات الرصدية، والمسارات المتوقعة، والمحاكاة الحاسوبية، حقق علماء الفلك هدف سبيس غارد في تحديد معظم الأجرام القريبة من الأرض التي يبلغ حجمها 1 كم في العام 2009، وتقريباً ضمن المهلة المحدّدة. تقترح الاكتشافات الحالية وجود نحو 940 كويكباً قريباً من الأرض بحجم 1 كم أو أكثر. قررت لجنة عقدتها الأكاديمية الوطنية للعلوم National Academy of Sciences أنه حتى مع اللايقين المبرَّر فإن هذا العدد دقيق جداً، ويُتوقع أن يكون العدد الإجمالي أقل من 1,100. ساعدت هذه الأبحاث أيضاً في تحديد 100,000 كويكب ونحو 10,000 كويكب قريب من الأرض بحجم أصغر من 1 كيلومتر.

تأتي معظم الكويكبات NAEs التي كانت هدفاً لمهمة سبيس غارد من المنطقة الداخلية والمتوسطة من حزام الكويكبات. وقد قررت لجنة الأكاديمية الوطنية أن 20% من المدارات التي لدينا بيانات عنها تمر ضمن 0.05 وحدة فلكية من الأرض. وتصف اللجنة تلك التي تقع في أماكن خطرة بأنها "أجرام كامنة المخاطر قريبة من الأرض" Potentially hazardous NEO. كما قررت اللجنة أيضاً أن أياً من هذه الأجرام لا يشكل خطراً خلال القرن المقبل، وهذه أخبار سارة بالطبع. ولكن النتيجة ليست مفاجئة تماماً لأن الأجرام بحجم 1 كم ليس من المتوقع أن تضرب الأرض أكثر من مرة كل بضع مئات الآلاف من السنين.

في الواقع، هناك جرم وحيد قريب من الأرض من المحتمل أن يضرب الأرض وأن يلحق بها الضرر في المستقبل القريب. ولكن احتمال أن يقترب منها هو 0.3%، وحتى هذا ليس من المتوقع أن يحدث قبل العام 2880. من شبه المؤكد أننا في أمان– على الأقل في الوقت الراهن– حتى ومع اللايقين المبرر. وفي وقت سابق، أثار بعض علماء الفلك من مخاوف حول كويكب آخر- وهو مسمًّى باسم يبعث على الخوف : أبوفيس Apophis- بحجم 300 متر، الذي من المتوقع ألا يصطدم بالأرض عند اقترابه منها في 2029 ولكن من المحتمل أن يعود ليصطدم بها في العام 2036 أو 2037. فمن المفترض أن يتبع ذلك مروره عبر "ثقب المفتاح الجاذبي" Gravitational keyhole، الأمر الذي اعتقدوا أنه من المحتمل أن يدفعه بسرعة كبيرة باتجاهنا. ولكن مزيداً من الحسابات كشف أن هذا إنذار خاطئ. لا أبوفيس ولا أي جرم معروف سيضرب الأرض في المستقبل القريب.

ولكن قبل أن تتنفس الصعداء، تذكر أنه لا تزال هناك أجرام أصغر ينبغي أن تثير قلقنا. مع أن الأجرام الأصغر من 1 كيلومتر التي استهدفها سبيس غارد في البداية هي أقل ضرراً، لكن من المفترض أن تقترب أو تضرب بتواتر أكبر. لذلك مُدِّدت مهمة سبيس غارد بناءً على تعليمات من مجلس الشيوخ في العام 2005

لتشجيع الولايات المتحدة على الاستمرار في تتبع وفهرسة وتوصيف 90% على الأقل من الأجرام القريبة من الأرض والخطيرة من التي يتجاوز عرضها أكثر من 140 متر. من شبه المؤكد أنهم لن يعثروا على شيء كارثي بحق، ولكن الفهرس مع ذلك هدف مهم.

تقييم الخطر

من الواضح أن الكويكبات تقترب من الأرض أحياناً. وستحدث اصطدامات من دون شك، ولكن يبقى تواترها وحجمها المتوقع موضوعين للجدل. وسؤال ما إذا كان شيء ما سيضرب الأرض ويلحق بها الضرر في المقاييس الزمنية البعيدة المدى هو أمراً يستحق أن يستحوذ على اهتمامنا، إنما هو سؤال غير محسوم بعد.

أيجب أن نقلق؟ الأمر كله يعتمد على المقاييس، والتكلفة، ومقدار قلقنا، والقرارات التي تتخذها المجتمعات حول ما هو مهم، وما نظن أننا نستطيع التحكم فيه. تهتم فيزياء هذا الكتاب بنحو رئيس بالظواهر التي تحصل على مقياس زمني يتراوح بين مليون وبليون سنة. وقد يفسر النموذج الذي عملت عليه- والذي يتحدث عنه الجزء التالي من الكتاب- دورة الـ 30 إلى 35 مليون سنة لضربات النيازك الكبيرة (بضعة كيلومترات ونيف). ما من واحد من هذه المقاييس الزمنية مثار قلق أو مهمٌّ للإنسانية. فللناس حاجات أكثر إلحاحا بكثير.

لكن، حتى وإن كان استطرادا مني، فلا يسعني أن أؤلف كتاباً يتحدث عن الضربات النيزكية من دون الإشارة على الأقل إلى استنتاجات العلماء المبرهنة حول اصطدامها المحتمل بعالمنا. يبرز هذا الموضوع في الأخبار وفي المحادثات بما يكفي بحيث لا يضر أن نستعرض بعض التقديرات. والتوقعات مهمة للحكومات أيضاً عندما يأخذون بعين الاعتبار مدى أهمية استشعار وتحويل مسار الكويكبات.

بحسب قانون الاعتمادات المالية الموحد للكونغرس للعام 2008، طلبت ناسا من مجلس البحث الوطني National Research Council التابع للأكاديمية الوطنية للعلوم المرموقة دراسة الأجرام القريبة من الأرض. لم يكن الهدف دراسة أي من مسائل الاصطدام على التجريد، بل تقييم المخاطر التي قد تطرحها كويكبات شاردة وإذا ما كان هناك شيء يمكن عمله لتقليل المخاطر.

ركز المشاركون دراساتهم على الأجرام NEOs، التي تضرب بتواتر أكثر ومن المحتمل العمل على تحويل مسارها. مدارات المذنبات قصيرة الأمد تشبه الكويكبات في مساراتها، لذلك من الممكن استشعارها بطريقة مشابهة. في المقابل، من المستحيل افتراضياً رؤية المذنبات طويلة الأمد بنحو مسبق. كما من الأقل ترجيحاً أن تكون على مستوى استوائي مع مدار الأرض- إنها تأتي من جميع الاتجاهات- لذلك فإن العثور عليها أكثر صعوبة. لكن على الرغم من أن بعض الأحداث المشاهدة حديثاً قد يعود أصلها إلى المذنبات، تصل المذنبات إلى محيط الأرض بتواتر أقل. وسيكون من المستحيل تحديد المذنبات طويلة الأمد في الوقت المناسب لأداء أي عمل احترازي- حتى وإن مكنتنا التطورات التقنية بالنهاية من تحويل مسار الكويكبات. ولأنه من المستحيل افتراضياً في هذه المرحلة إنشاء فهرس كامل للمذنبات طويلة الأمد الخطرة، تركز الاستطلاعات الحالية فقط على الكويكبات والمذنبات قصيرة الأمد.

ولكن ستكون المذنبات طويلة الأمد- أو على الأقل تلك المذنبات التي تنشأ من المنطقة الخارجية للمجموعة الشمسية- محط اهتمامنا لاحقاً. فالأجرام التي تنشأ في المنطقة الخارجية من المجموعة الشمسية أضعف ارتباطاً بكثير، لذلك من السهل أكثر للاضطرابات- بفعل الجاذبية أو غيرها- أن تدفعها خارج مسارها وإلى المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية أو إلى خارج المجموعة الشمسية برمتها. على الرغم من أنها ليست موضوع دراسات الأكاديمية الوطنية للعلوم، فإنها لا تزال موضوع عديد من الأبحاث العلمية.

استنتاجات العلماء

في 2010، قدمت الأكاديمية الوطنية للعلوم نتائجها عن الكويكبات والخطر الذي تثيره في وثيقة بعنوان: الدفاع عن كوكب الأرض: *استفتاءات عن الأجرام القريبة من الأرض واستراتيجيات تخفيف خطرها* *Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies*.
سأعرض بعضاً من أكثر استنتاجات الوثيقة إثارة للاهتمام، وأعيد عرض بعض من الجداول والرسومات البيانية التي تلخصها بأفضل طريقة، وأضيف بعض التعليقات لشرحها.

عند تفسير الأرقام، تذكَّرْ أن تأخذ بعين الاعتبار عامل الكثافة المنخفضة للمناطق الحضرية عالية الكثافة السكانية، التي يقدرها مشروع التخطيط الحضري العالمي بثلاثة في المئة. على الرغم من أنه بالطبع من غير المرغوب فيه وقوع أي دمار، فإن أخطر تهديد سيكون على منطقة حضرية مأهولة. تدلنا الكثافة المنخفضة للمدن على سطح الأرض أن نسبة تواتر ضرب أي جرم صغير نسبياً الأرضَ وإلحاقه ضرراً جسيماً هي أقل بثلاثين مرة من تواتر اصطدامها. على سبيل المثال، إذا كان من المتوقع أن يضرب جرم يتراوح حجمه بين خمسة وعشرة أمتار مرة في كل القرن، فمن المتوقع أن شيئاً بهذا الحجم سيضرب المدن مرة كل ثلاثة آلاف سنة.

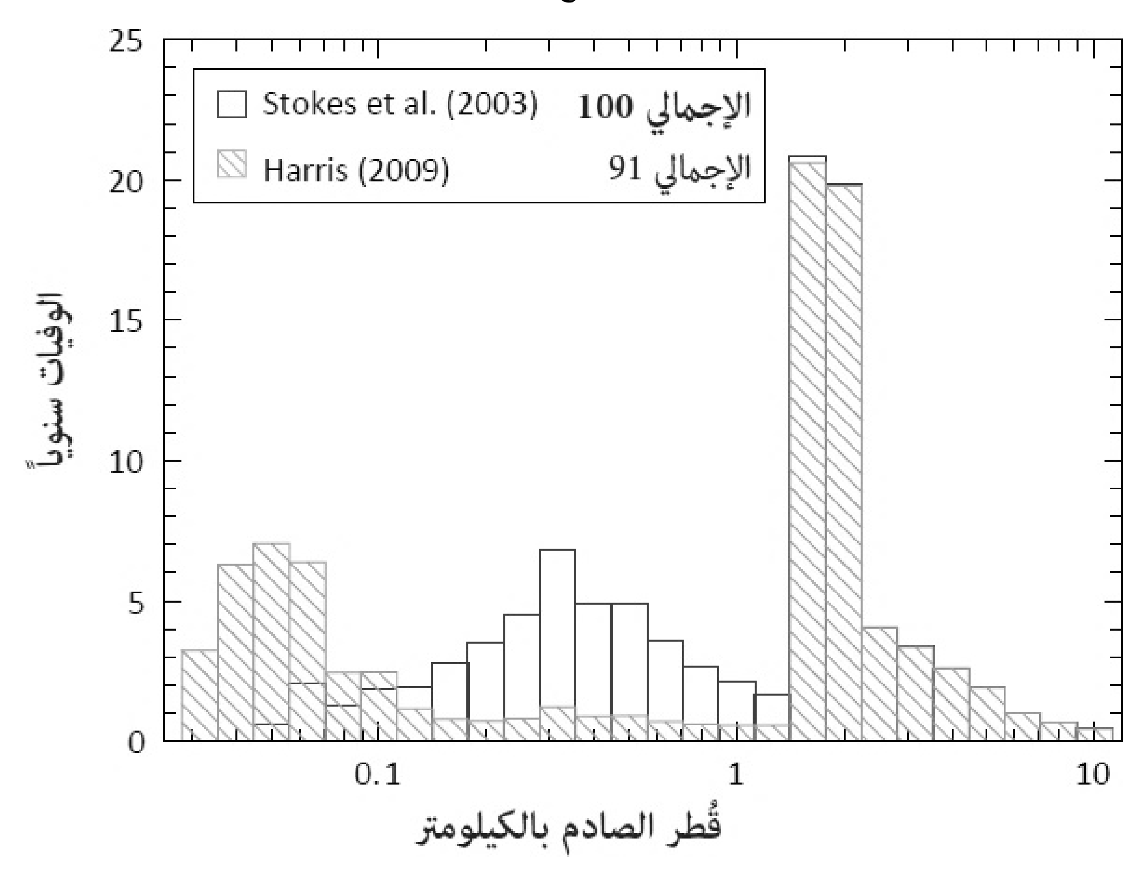
يجدر بنا أيضاً أن نضع في عين الاعتبار مقدار اللايقين الكبير في معظم هذه التوقعات، التي يمكن أن يقدرها العلماء بما يعادل عاملا من 10 أضعاف بأحسن الأحوال. أحدُ أسباب القصص الإخبارية حول تهديدات بعيدة لا تتحقق هو أنه حتى بالنسبة إلى جرم معين بحجم معين، قد يؤدي خطأ ضئيل في قياس المسارات إلى اختلاف كبير في احتمال ضربته المتوقعة. كما أننا لا نفهم تماماً تأثيرات الضرر التي يمكن أن تسببها الأجرام الكبيرة المعروفة. حتى مع مثل هذا اللايقين، تبقى النتائج من دراسة الأكاديمية الوطنية للعلوم موثوقة ومفيدة. لذلك مع السماح بدرجة قليلة من اللايقين، دعونا نستطلع هذه الإحصائيات المذهلة (الصادرة نحو العام 2010).

عدد الوفيات المتوقع بالسنة، عالميا، بأسباب مختلفة

السبب	عدد الوفيات
هجمات أسماك القرش	7-3
كويكبات	91
زلازل	36,000
ملاريا	1,000,000
حوادث السير	1,200,000
تلوث الهواء	2,000,000
نقص المناعة/ الإيدز	2,100,000
التبغ	5,000,000

[الشكل: 17] إحصائيات الأكاديمية الوطنية للعلوم حول متوسط عدد الوفيات سنويا في العالم من مجموعة أسباب مختلفة. تستند الإحصائيات إلى بيانات ونماذج وتوقعات.

جدولي المفضل هو الشكل 17. بحسب هذه النتائج، متوسط الوفيات سنويا هو 91 وفاة بسبب الكويكبات. مع أن الكويكبات من أقل أسباب الموت الكارثية– هذه المعدلات قريبة من معدلات حوادث الكراسي المتحركة المميتة (غير المصنفة في الجدول)– لكن الرقم 91 سنويا في الجدول إلى الكويكبات هو رقم مرتفع بنحو مفاجئ ومقلق. كما أنه دقيق بشكل مبالغ به إذا أخذنا بعين الاعتبار مقدار اللايقين. من الواضح أنه لا تحصل 91 حالة وفاة سنوياً بسبب الكويكبات. بل في الواقع، نحن نعلم القليل فقط من مثل حالات الوفاة هذه في التاريخ المسجل. الرقم الكبير مرتفع بنحو مضلل لأنه يشتمل على ضربات هائلة لا تقع إلا نادرا فقط. إليك رسما توضيحيا (الشكل 18) ليساعد على شرح هذا.

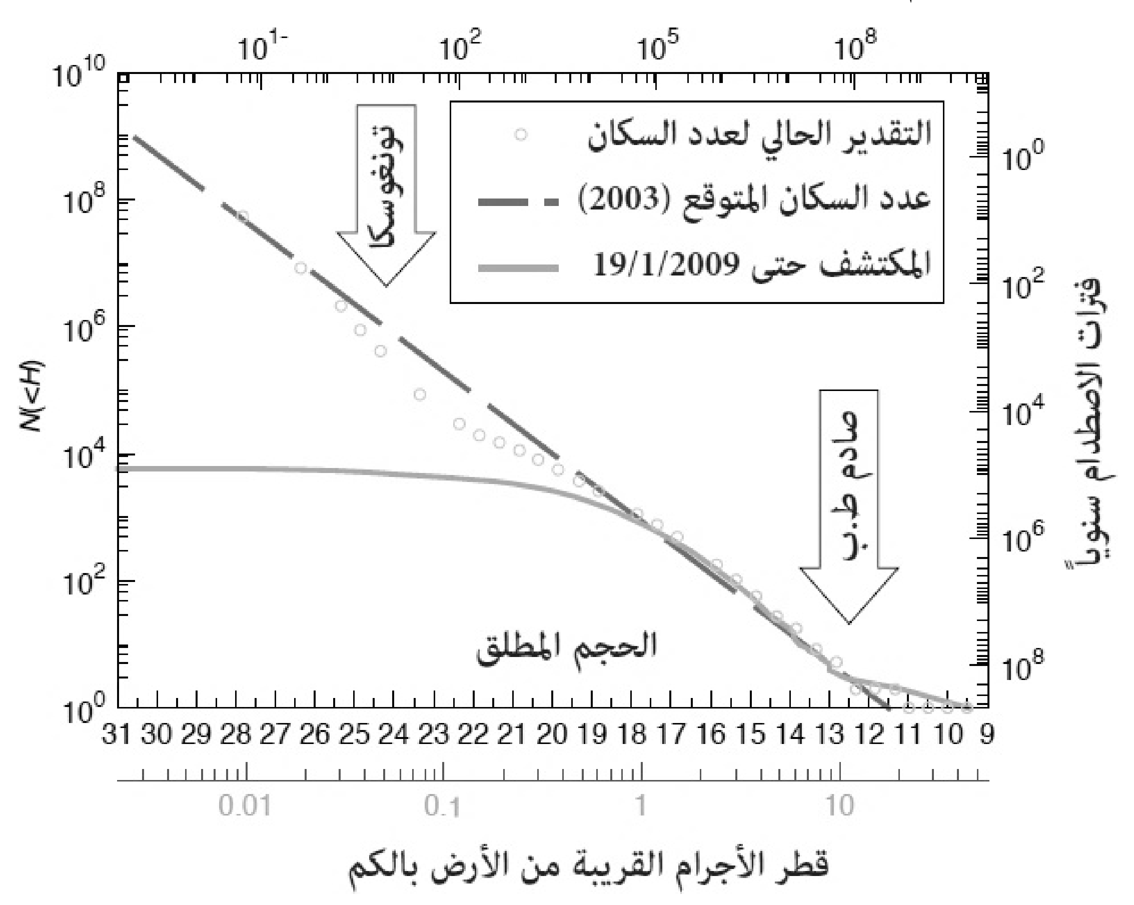


[الشكل: 18] تقديرات الأكاديمية الوطنية للعلوم حول معدل الوفيات الناتجة عن اصطدام كويكبات من أحجام مختلفة بالاستناد إلى بيانات كاملة بنسبة 85% من استطلاع سبيس غارد. يستخدم هذا المخطط توزيع أحجام الأجرام القريبة من الأرض المعدل حالياً وتقديرات محدثة عن تهديدات من تسونامي أو انفجار هوائي. كما يعرض الشكل تقديرات سابقة للمقارنة.

يبين هذا الرسم أن معظم الأعداد المذكورة أعلاه تأتي من أجرام أكبر، والتي لا يتوقع وقوعها إلا بندرة شديدة. وكبر الحجم يكون بعدة كيلومترات. مثل هذه الحوادث هي "البجعة السوداء" Black swans بالنسبة إلى ضربات الكويكبات. إذا ركزت اهتمامك على الأجرام بحجم أقل من 10 أمتار، ينخفض العدد إلى أقل من عدة حوادث في السنة، الذي ربما لا يزال رقماً مرتفعاً. إذن ما توقعات تواتر ضرب أجرام بأحجام مختلفة الأرضَ فعلاً؟ فيما يلي رسم آخر (الشكل 19). هذا الرسم أكثر تعقيداً بقليل، ولكن تحمل معي. إنه في الواقع تلخيص رائع لفهمنا الحالي.

على الرغم من أنه أصعب من حيث الفهم، يحتوي هذا الرسم على كثير من المعلومات. وهو يستخدم ما يعرف بالمقياس اللوغاريتمي Logarithmic scale. وهذا يعني أن التغيرات في الحجم تتوافق مع انحرافات زمنية أكبر مما قد تعتقد. على سبيل المثال، قد يصل جرم بحجم 10 أمتار مرة كل 10 سنوات في حين قد يضرب جرم بحجم 25 مترا الأرض مرة كل 200 سنة. كما يعني أن التغيرات الصغيرة في القيم المَقِيسة قد تؤثر في التنبؤات تأثيرا كبيرا.

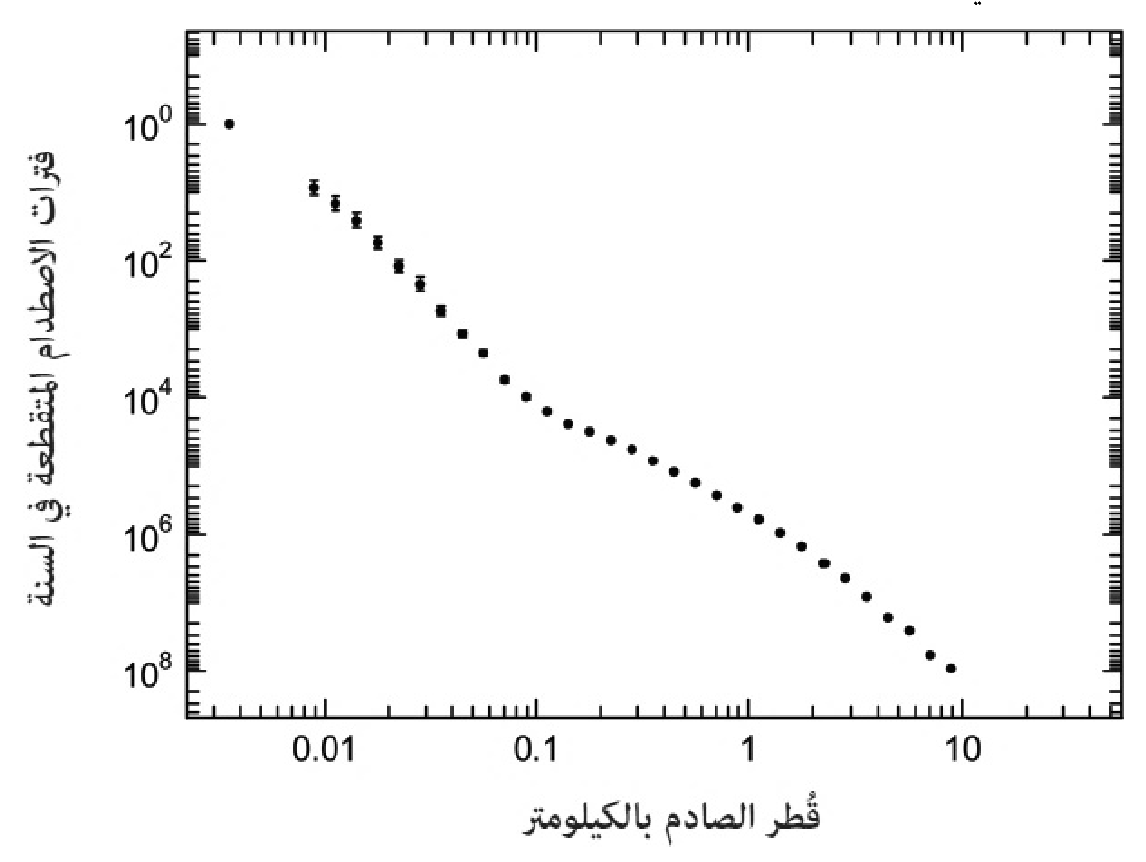
يشير المحور الأعلى في الرسم إلى كمية الطاقة التي سيطلقها جرم بحجم معين، بافتراض أنه يسافر بسرعة 20كم/ث، كما هو مَقِيس بالميغا طن. لذا، على سبيل المثال، سيطلق جرم بحجم 20 مترا طاقة بنحو 1 ميغا طن. كما يبين الرسم عدد الأجرام المتوقعة من مختلف الأحجام، ومدى توهجها المرجح– المتعلق أيضاً بسهولة تتبعها وإيجادها- على الرغم من العدد الأكبر للكويكبات الأصغر حجماً، ويصعب العثور عليها نظرا إلى صغر حجمها ومن ثم سطوعها الأدنى صعوبة.



[الشكل: 19] العدد المقدر (المحور العمودي الأيسر) والوقت التقريبي بين فترات اصطدام الأجرام القريبة من الأرض بقطر مَقِيس بالكيلومتر (المحور الأيمن). يعطي المحور الأعلى طاقة الاصطدام المتوقعة بميغا طن من المتفجرات TNT لأي عنصر بحجم معين، بافتراض أنه يتحرك بسرعة 20 كم/ث عند الاصطدام. كما يظهر بالقرب من المحور الأفقي الأسفل الكمية المتعلقة بالسطوع الذاتي Intrinsic brightness للجرم. تستند خطوط المنحنيات المختلفة إلى تقديرات أقدم (خطوط) وأحدث (دوائر). ويبين المنحنى الأسفل عدد الأجرام المكتشفة قبل العام 2009.

ستكون تقديرات التواتر لهذه الأحداث، على سبيل المثال، جرما بحجم 500 متر كل 100,000 سنة تقريباً، وجرما بحجم 1 كم ربما مرة كل 500,000 سنة، وجرم بحجم 5 كم بمعدل قريب من 20 مليون سنة. كما يبين الرسم أن صادماً بحجم 10 كم يقتل الديناصورات من المرجح أن يأتي مرة كل عشرة ملايين إلى مئة مليون سنة.

إذا كنت مهتماً بنحو خاص بتواتر الضربات، فالمعلومات أوضح في الرسم الأبسط في الشكل 20. لاحظ أن المحور العمودي يقيس السنوات الأقل في الأعلى والسنوات الأكثر في الأسفل. ولاحظ أيضاً الأرقام الاستثنائية في الخط العمودي التي تحدد عدد المرات بالعدد 10 مضروباً في نفسه. على سبيل المثل، 10^1 هي 10، 10^2 هي 100، و10^0 هي واحد.



[الشكل: 20] متوسط عدد السنوات بين اصطدامات من أجرام قريبة من الأرض بأحجام تتراوح بين نحو 3 أمتار إلى نحو 9 كيلومترات عرضاً.

أخيراً، للتوصل إلى تصور حول درجة خطورة أجرام بأحجام مختلفة، سأعرض رسماً أخيراً من دراسة الأكاديمية الوطنية للعلوم في الشكل 21. يبين هذا الجدول أنه في حالة جرم بقطر بضعة كيلومترات، فإن الكوكب بكامله سيتأثر. لا تحدث اصطدامات النيازك الكبيرة بتواتر مثل الكوارث الطبيعية الأخرى، لذا من شبه المؤكد أنها لا تثير أي تهديد مباشر. ولكن في حال حدوثها، سيكون اصطدامها من ناحية الطاقة والشدة كارثياً. يبين الجدول أيضاً، على سبيل المثال، أن شيئاً بعرض 300 متر قد يضرب الأرض مرة كل 100,000 سنة. يمكن لهذا أن يزيد انبعاث الكبريت في الجو إلى مستويات قريبة من تلك التي سببها بركان كراكاتاو، مدمرا الحياة أو على الأقل الزراعة على رقعة كبيرة من الكوكب. وكما في الرسومات السابقة، يبين لنا أن انفجاراً في الجو بحجم تونغوسكا قد يحدث مرة كل 1000 سنة. ستعتمد المعالم الكاملة لأي من سيناريوهات هذه الكوارث بالطبع على الحجم والمكان الذي تضربه.

نوع الحادثة	قُطر الجرم الصادم	طاقة الاصطدام التقريبية (ميغا طن)	معدل الفترات بين الاصطدامات (سنة)
متوسط الفترات الفاصلة وطاقة اصطدام الأجرام القريبة من الأرض التقريبية			
انفجار في الجو	25 م	1	200
المقياس المحلي	50 م	10	2,000
المقياس الإقليمي	140 م	300	30,000
المقياس القاري	300 م	2,000	100,000
تحت عتبة الكارثة العالمية	600 م	20,000	200,000
كارثة عالمية محتملة	1 كم	100,000	700,000
فريق عتبة الكارثة العالمية	5 كم	10,000,000	30,000,000
إبادة شاملة وانقراض	10 كم	100,000,000	100,000,000

[الشكل: 21] متوسط الفترات الفاصلة وطاقة الاصطدام التقريبية للأجرام القريبة من الأرض من مختلف الأحجام. تذكر أن هذه الكميات تعتمد على سرعة الصادم وميزاته الكيميائية والفيزيائية.

ما العمل

إذن ماذا علينا أن نستنتج من كل هذا؟ أولاً، من المذهل أن جميع هذه الأجرام في الفضاء تدور في المحيط العام نفسه. نحن ننظر إلى كوكب الأرض على أنه مميز وبالطبع نريد أن نحميه. ولكن في الصورة الأكبر، إنه أحد الكواكب الداخلية في المجموعة الشمسية التي تدور حول نجم معين. لكن، حتى مع الاعتراف بقرب جيراننا، النقطة الأخرى التي يجب استبعادها هي أن الكويكب ليس أعظم تهديد للبشرية. قد تحدث الاصطدامات وقد تسبب أضراراً حتى، ولكن الناس ليسوا فعلاً في خطر داهم- على الأقل ليس من هذه الناحية.

مع ذلك، السؤال عما يجب فعله في حال ظهور شيء خطر على وشك أن يطرح. سنشعر بالحماقة إذا كنا نراقب جرماً في مسار خطر ضمن مجال الأرض عدةَ سنوات، ولكننا عاجزون عن العمل بأي شيء لتحسين قدرنا. لا يعني عدم وجود خطر محدق أن نكون عاجزين بشكل تام عن الحماية ضد أي ضرر قد يسببه نيزك، أو ألا نفكر أبدا باستعدادات تخفيف المخاطر.

وليس من المدهش أن عددا من الأشخاص فكروا في المشكلة، ولا تزال عديد من الاقتراحات- وإن كانت من دون أدوات فعلية- للتعامل مع الأجرام الخطرة الآتية من السماء قيد الدراسة. الاستراتيجيتان الأساسيتان هما التدمير أو الإزاحة. التدمير بحد ذاته ليس فكرة رائعة بالضرورة. إذا اضطلعتَ بتفجير شيء خطر يهدد بأن يضرب الأرض إلى كثير من الأجزاء الصخرية المندفعة بالاتجاه نفسه، فأنت في الغالب ستزيد فرص الضربة. مع أن الضرر من أي قطعة معينة سيكون أقل، من الأفضل إيجاد استراتيجية لا تشجع عدداً أكبر من الضربات.

لذا لعل الإزاحة طريقة معقولة أكثر. تستلزم أكثر استراتيجيات الإزاحة عملية زيادة أو تقليل سرعة جرم آتٍ- وليس دفعه جانبيا. الأرض صغيرة جداً وتتحرك بسرعة حول الشمس- نحو 30 كم/ث. بحسب الاتجاه الآتي منه الجرم، يمكن أن يكون تغيير مساره بحيث يصل قبل أو بعد سبع دقائق- الوقت الذي تستغرقه الأرض لتتحرك مسافة تعادل قطرها- هو الفرق بين اصطدام وبين تحليق مثير ولكن من دون أضرار. هذا لا يحتاج إلى تغيير كبير في المدار. إذا رُصِد جرم في وقت مبكر بما يكفي- ربما عدة سنوات مسبقاً- حتى التغيير الطفيف في السرعة سيكون كافياً.

لن تنقذنا أي من اقتراحات التدمير أو الإزاحة من جرم أكبر من عدة كيلومترات قادر على إلحاق ضرر عالمي. من حسن الحظ، ربما لن يحصل مثل هذا الاصطدام على مدى مليون سنة أخرى على الأقل. أما في حالة الأجرام الأصغر التي يمكننا أن ننقذ أنفسنا منها من حيث المبدأ، فستكون أفضل عوامل الإزاحة فعالية التفجيرات النووية، التي يمكنها ربما أن تمنع اصطدام شيء بعرض واحد كيلومتر. لكن، تمنع القوانين التفجير في الفضاء، على الأقل في الوقت الحالي، لذلك فإن هذه التقنية ليست قيد التطوير. من الممكن أيضاً، وإن لم يكن بالقوة نفسها، أن يصطدم جرم ما بكويكب آتٍ بحيث ينقل الطاقة الحركية Kinetic energy. إذا رُصِد مبكرا بما يكفي، وخاصة مع احتمال اصطدامات متعددة، يمكن أن تنجح هذه الاستراتيجية في حالة الأجرام الآتية التي يصل عرضها إلى عدة مئات الكيلومترات. أما عوامل الإزاحة المقترحة الأخرى فتشمل استخدام الألواح الشمسية والأقمار الاصطناعية التي ستعمل كقاطرة جذب، أو محركات صواريخ- أي شيء له القدرة على أن يخلق قوة كافية. قد تكون التقنيات فعالة في حالة أجرام بحجم مئة متر، ولكن فقط إذا توافر لنا تحذير مبكر قبل بضع عشرات من السنين. تتطلب جميع هذه الطرق (والكويكبات نفسها) دراسة أعمق لذلك لا يزال من المبكر تحديد ما يمكن أن ينجح يقيناً.

لا تزال هذه مجرد مقترحات، على الرغم من أنها مثيرة وتستحق الدراسة، مجرد رؤى ممكنة للمستقبل. لا توجد تقنية كهذه في الوقت الحالي. ولكنْ هناك مشروع - ألا وهو مهمة تقييم ضرب وإزاحة الكويكبات Asteroid Impact and Deflection Assessment mission- مصمم لاختبار جدوى الاصطدام الحركي بالكويكبات، وقد قطع شوطاً نسبياً من التخطيط. كذلك هناك مشروع آخر قائم مرتبط- مهمة إعادة توجيه الكويكبات- والذي سيزيح كويكباً أو جزءاً من كويكب إلى مدار حول القمر وربما يستقبل زيارة رائد فضاء في وقت لاحق. لكن لم يبدأ أي إعداد فعلي في هذه المشروعات بعد.

يعترض البعض على بناء تقنية مضادة للكويكبات على الأرض لأنها قد تسبب ضرراً من ناحية أعم. يخاف البعض، على سبيل المثال، أن تستخدم مثل هذه التقنية لأهداف حربية بدلاً من إنقاذ الأرض- على الرغم من أنني أجد هذا غير محتمل جداً نظراً إلى إلى الوقت المسبق الذي يتطلبه أي جهاز تخفيف مخاطر ليكون فعالاً. ويثير آخرون موضوع الخطر النفسي والاجتماعي المحتمل من إيجاد كويكب على مسار يعترض الأرض في وقت متأخر أو يفوق قدرتنا التقنية بأداء أي شيء- ما أجده تكتيكا تأجيليا يمكن استخدامه ضد الكثير من الاقتراحات البناءة المحتملة.

لنترك هذه المخاوف الوهمية جانباً، يمكننا مع كل هذا أن نسأل عما إذا كان علينا أن نؤدي أي تحضيرات، وإذا كان الأمر كذلك، متى إذن. هذه المسألة هي مسألة تتعلق بالتكلفة المادية والقدرة على تخصيص موارد. تعقد الأكاديمية الدولية للملاحة الفضائية International Academy of Astronautics اجتماعات لمناقشة هذا النوع من الأسئلة على وجه التحديد ولتحديد أفضل استراتيجية. أخبرني زميل لي حضر

مؤتمر الدفاع الكوكبي Planetary Defense Conference في فلاغستاف، أريزونا في عام 2013 عن تمرين كان فيه على الحضور أن يفترضوا وجود كويكب زائف يقترب وعليهم أن يسألوا أنفسهم ما هي أفضل طريقة لمناقشة الخطر الزائف. طلب منهم الإجابة عن أسئلة مثل "كيف نعالج الشكوك حول حجمه ومداره لنبقى على اطلاع طوال الوقت؟"، و"متى هو الوقت المناسب للتصرف؟"، "وفي أي مرحلة يجب علينا الاتصال برئيس الولايات المتحدة؟" (كان الاجتماع في الولايات المتحدة في نهاية المطاف)، "ومتى الوقت المناسب لإخلاء منطقة ما؟"، و"متى تطلق صاروخاً نووياً لتمنع كارثة محتملة؟". توضح هذه الأسئلة- وإن كنت أجدها مسلية إلى حد ما- أنه حتى علماء الفضاء المثقفون وحسنو النية يمكن أن تكون لهم مواقف واستجابات مختلفة حيال أي جرم آتٍ من الفضاء.

أتمنى أن أكون قد أقنعتك بأن مثل هذه الأخطار ليست ملحة إلحاحا كبيرا، حتى مع احتمال حدوث بعض الضرر. مع أنه من الممكن أن يضرب خطر موجه بنحوٍ غير موفق مركزاً مأهولاً رئيساً ويمسحه، ولكن احتمالات حصول هذا في أي وقت في المستقبل القريب هي احتمالات مستبعدة جداً. يسعى العالِم في داخلي إلى فهرسة وفهم مسارات أكبر قدر ممكن من الأجرام. بينما يفكر المهووس في داخلي أن مركبة فضائية ترافق جرماً خطيراً قريباً من الأرض إلى مدار آمن لن يضرب فيه الأرض منه سيكون أمراً رائعاً. ولكن حقاً، لا أحد يعلم بنحو مؤكد ما هي أفضل طريقة للعمل.

أهم المواضيع بالنسبة إلى المجتمع، مع جميع الجهود العلمية والهندسية، هي ما نقدّره، وما نتعلمه، وما قد تكون الفوائد الثانوية. يمكنك الآن أن تعتبر نفسك مسلحاً ببعض الحقائق الأساسية إذا ما اخترت أن تقيّم رأياً ما. تساعدنا الأرقام الحالية، ولكنها ليست كاملة. كما حالُ عديد من الخيارات السياسية، علينا أن نجمع التنبؤات العلمية مع الاعتبارات العملية والضرورات الأخلاقية. أشعر أنه حتى من دون أي تهديد، العلم مثير بما يكفي ليستحق الاستثمار القليل نسبياً والضروري لإيجاد مزيد من الكويكبات ودراستها أكثر. ولكن الوقت فقط هو ما سيخبر المجتمع- وصُنَّاعَه خاصة- ما يجب اتخاذه من قرارات.

في رحلة إلى اليونان أخيرا، كنت أشعر بالتواضع أحياناً أمام استخدام السكان المحليين هناك بعضَ المفردات الإنجليزية المثيرة، ممن يستخدمون أحياناً كلمات قد أتردد أنا- وهي لغتي الأم- في قولها. علَّقت على هذا الموضوع عندما استخدم أحدهم كلمة Eponymous، التي ذكرني مُكلمي أن منشأها يوناني، كعديد من كلماتنا بالطبع.

وكلمة Crater "فوهة" من بين هذه المفردات. وعلى ما يبدو، على الرغم من كون الشعب الإغريقي القديم يحبذ شرب النبيذ، إلا أنه قدّر الاعتدال أيضاً. وما لم تكن الحفلة صاخبة، كان النبيذ يمزج مع ثلاثة أضعاف كميته من الماء، ومنه اشتقت كلمة Krater لإبريق المزج. ولإبريق المزج فتحة مستديرة عريضة- تشبه قليلاً شكل الفوهات على الأرض والقمر التي تحمل الاسم نفسه. غيرَ أن الملامح الجيولوجية التي يطلق عليها الاسم المشابه قد تصل إلى 200 كيلومتر عرضاً، بل وقد تكون المنطقة المحيطة المتأثرة أكبر.

تتشكل بعض الفوهات على الأرض بفعل البراكين، من دون أي مساعدة خارجية. على تينيريف Tenerife في جزر الكناري، على سبيل المثال، يمكنك أن ترى بعض الفوهات المذهلة في حقل الحمم البركانية لبركان إل تيد El Teide- وهو دليل على الاضطرابات تحت سطح الأرض والتي تتصاعد فقاعاتها إلى السطح بين الفينة والأخرى. وفي اليونان أيضاً علمتُ أن كلمة Caldera "كالديرا" هي اللفظ الإسباني لكلمة "Cauldron" التي تعني قِدْراً أو وعاءً، وهكذا عرفتُ أن المصطلح الذي نستخدمه لوصف التجويف البركاني له أصل يشبه كلمة "Crater". من جهة أخرى، تتشكل الفوهات الصدمية بمعزل وبمساهمة من الفضاء الخارجي بشكل ملحوظ.

حدثت معظم الاصطدامات النيزكية- بما فيها الاصطدامات الكبيرة- قبل فترة طويلة من وجود بشر ليشهدوها، فما بالك بأن يسجلوها. الفوهة الصدمية هي بطاقة الزيارة Calling card المميزة التي يخلفها نيزك مسرع هبط على الأرض. الفوهات والتجاويف والمواد الموجودة فيها وحولها هي الدليل الوحيد الناجي للزوار المشاغبين الذين عاثوا تخريبا في الأخضر واليابس. تقدم لنا الندوب وأنواع الصخوروالثراء الكيميائي المدفون في الحطام المعلوماتِ الموثَّقة عن هذه الأحداث القديمة.

تقدم الفوهات الصدمية دليلاً مميزاً عن ارتباط الأرض الدائم ببيئتها- أي المجموعة الشمسية. يساعدنا فهم تشكيل وشكل وخواص الفوهات الصدمية على تحديد مدى تواتر اصطدام الصخور بمختلف أحجامها بالأرض، إضافةً إلى مناقشة الدور الممكن للنيازك في انقراض الكائنات الحية بأسلوب مستنير بالبيانات. سأشرح في هذا الفصل كيف ولماذا تشكلت هذه الفوهات المَهيبة بالدرجة الأولى- وما يميز الفوهات الصدمية عن التجاويف الناشئة أرضياً بفعل البراكين. كما سأعلق على قائمة الأجرام التي ضربت الأرض بقوة كافية لترك طبعات باقية، والمفهرسة بشكل جميل في قاعدة بيانات اصطدامات الأرض التي يمكن استخدامها على الإنترنت. وستتبين أهمية هذه الملاحظات في وقت لاحق عندما أتحدث عن دور المادة المعتمة في إثارة الاصطدامات النيزكية.

الفوهات الشهابية

قبل التعمق في تشكل الفوهات الصدمية والقائمة الكاملة لها هنا على الأرض، فلنتأمل لحظة أول فوهة عُثِر عليها – أحد أول الاكتشافات التي تربط الأجرام في السماء بسطح الأرض (انظر: الشكل 22). على الرغم من أن الاسم غير مناسب قليلاً– تذكر "الشهاب" هو الشعاع في الهواء– تشكلت الفوهة الشهابية على الأقل بفعل نيزك، كما هي حال الفوهات الصدمية، من حيث التعريف. تقع هذه الفوهة الشهابية بالقرب من فلاغستاف، آريزونا. يرتبط اسمها مع مكتب بريد مجاور، وذلك وفقا لما هو متعارف عليه بالنسبة إلى تسمية النيازك Meteoroid naming convention. أسس ثيودور روزفلت Theodore Roosevelt مكتب البريد في العام 1906 عندما بدأ صديقه دانيل بارينغر Daniel Barringer، مهندس تعدين ورجل أعمال، دراسة مكونات الفوهات الغامضة ومنشئِها. في البداية شكك علماء الجيولوجيا في اقتراحه، ولكن بارينغر أثبت في النهاية أن الفوهة نشأت من نيزك. يعرف التجويف أيضاً باسم فوهة بارينغر Barringer Crater تقديراً لمساهمته.



[الشكل 22] فوهة شهاب بارينغر بعرض 1 كيلومتر تقريباً في أريزونا. (صورة جوية إهداء من د. رودي).

على الرغم من وجود بنى صدمية أكبر، فإن هذه الفوهة هي من أكبر الفوهات في الولايات المتحدة– تصل إلى نحو 1200 متر عرضاً و170 مترا عمقاً، وحافة ترتفع عن الأرض بنحو 45 مترا. يقدر عمرها بنحو 50 ألف سنة، ويمكنك أن تراها من فوق سطح الأرض. إذا لم تكن واضحة على الخريطة، يمكنك أن تخمن أن الفوهة في أمريكا لأنها، كعديد من الأشياء في أمريكا، ملكيةٌ خاصة. تمتلك عائلة بارينغر الأرض من خلال شركة فوهة بارينغر Barringer Crater Company وهم حالياً يتقاضون 16 دولاراً للشخص لرؤيتها. ثُبِّتت الملكية في العام 1903، عندما طالب بارينغر وعالم الفيزياء والرياضيات بنجامين تشو تيلمان Benjamin Chew Tilghman بحقوق الملكية، والتي سرعان ما صادق عليها رئيس الولايات المتحدة. أُعطيت الشركة المطالِبة بالحق– شركة الحديد القياسية Standard Iron Company– الإذنَ بالتنقيب وملكية 640 فدانا من الأرض.

لأنها ملكية خاصة، لا يمكن أن تُدرج الفوهة ضمن نظام الحدائق الوطنية. فقط الأراضي التابعة لملكية الدولة يمكنها أن تحتضن صروحاً وطنية، لذلك فإنها مجرد معلم وطني طبيعي. الجيد في الأمر أنها لا تُغلَق عندما يتعطل عمل الحكومة، كما حصل في العام 2013 عندما بدأتُ كتابة هذا الفصل. والميزة الجيدة الأخرى في كونها ملكية خاصة هي أن لعائلة بارينغر مصلحة في الحفاظ على الفوهة، وهي فعلاً تعَد أفضل موقع اصطدام نيزكي محمي– مع أن أصله الحديث نسبياً يساعد على ذلك كثيراً أيضاً.

يسمى النيزك المرتبط بالفوهة نيزك ديابلو Diablo meteorite، نسبة إلى اسم مدينة الأشباح كانيون ديابلو Canyon، التي تقع على امتداد الوادي الذي يحمل الاسم نفسه. لعل النيزك المرتبط بالفوهة، والذي

يصل عرضه إلى 50 مترا ويتكون من الحديد والنيكل الخالص، ضرب الأرض بسرعة 13 كم/ث، مولداً على الأقل طاقة تعادل 2 ميغا طن من المتفجرات TNT– عدة أضعاف طاقة تشيليابينسك أو تقريباً طاقة قنبلة هيدروجينية. تبخر معظم الجرم الأولي، لذا يصعب العثور على الشظايا. القطع التي عُثر عليها معروضة في المتحف هناك، وبعضها معروضة للبيع.

بسبب شح الشظايا، كان من الصعب في البداية التأكد من أن الفوهة قد تشكلت في الواقع بفعل جرم فضائي وليس بفعل بركان، كما افترض المهاجرون الأوروبيون عندما عثروا عليها أول مرة في القرن التاسع عشر. وقتَها لم تكن هذه فرضية غير معقولة، حتى إن بدا آنذاك تفسيرُ شيء آتٍ من الفضاء الخارجي أمراً غرائبيا، فضلاً عن قُرب الفوهة من حقل بركان سان فرانسيسكو -الذي يبعد 40 ميلا فقط.

في قصة تثقيفية عن علم سلك مسلكا خاطئا – ولم يُصحَّح إلا لاحقا – قدَّم رئيس إدارة المسح الجيولوجي في الولايات المتحدة الأمريكية U.S. Geological Survey، غروف كارل غيلبرت Grove Karl Gilbert، تقريره الرسمي بأن سبب الفوهة هو بركان ثار في العام 1891. إذ كان غيلبرت قد سمع عن الفوهة من تاجر المعادن الفيلاديلفي آرثر فوت Arthur Foote، الذي كان مهتماً بالحديد والذي وجده الرعاة في العام 1887 بالجوار. ميز فوت أن منشأ المعدن يعود إلى الفضاء الخارجي، فزار الموقع ليرى ما يمكن أن يستخرجه أيضاً. إضافةً إلى الحديد وجد ألماساً دقيقا جدا. تشكَّل هذا الألماس من الاصطدام ولكن فوت– الذي لم يعلم بذلك– اعتقد خطأً أن الجرم الذي سقط كان كبيراً بحجم القمر. ارتكب فوت خطأً آخر هو أنه لم يربط الفوهة مع مادة الحجر النيزكي التي كان يفحصها. على الرغم من تقبُّله لفكرة المنشأ الخارجي للمادة على الأرض– في ذهنه، كانت الفوهة المجاورة ظاهرة منفصلة نشأت بفعل نشاط بركاني.

من جهة أخرى، كان غيلبرت، الذي علم عن الفوهة من فوت، من أوائل من اقترحوا أنها نشأت بفعل نيزك. ولكن في أثناء محاولته إثباتَ ذلك بنحو علمي، وصل إلى الاستنتاج الخطأ. ولأن أحداً لم يفهم تكوين الفوهة الصدمية بعد، استبعد مخطئاً فرضية الاصطدام، لأن الكتلة عند الحافة لم تتطابق مع الكتلة المفقودة من الفوهة وأيضاً لأن الشكل كان دائرياً وليس بيضاوياً كما كان يتوقع من اصطدام آتٍ من جهة معينة. علاوة على ذلك لم يجد أحد أي دليل مغناطيسي على الاختلاف في الحديد الذي قد يشير إلى شيء من الفضاء الخارجي.

نظراً إلى الافتقار إلى الدليل على النيزك، اضطر غيلبرت وفقا لأسلوبه الخاص– الذي نفى العناصر الأكثر إثباتاً لتشكُّل الفوهة الصدمية والتي سأشرحها قريباً– إلى الاستنتاج خاطئا أن نشاطاً بركانياً كان هو المسؤولَ عن الفوهة وليس اصطداماً نيزكياً.

أُثبت أصل الفوهة بنحو صحيح أخيراً عندما نشر بارينغر وتليمان مجموعة من الوثائق الاستثنائية في "وقائع أكاديمية العلوم الطبيعية في فيلادلفيا" Proceedings of the Academy of the Natural Sciences of Philadelphia في العام 1905، التي بيّنا فيها أن فوهة النيزك Meteor Crater كانت فعلاً نتيجة اصطدام نيزكي من الفضاء الخارجي. اشتمل دليلهما على الطبقات المقلوبة للحافة، والتي قيل لي إنها تستحق المشاهدة، وأكسيد النيكل في الرواسب. لكن، شظايا الحديد المؤكسد حول فوهة الحجر النيزكي الذي يزن 30 طنا قادت بارينغر إلى ارتكاب خطأ مختلف ومكلف. اعتقد بارينغر أن معظم الحديد المتبقي قد دُفن تحت الأرض، وأمضى 27 سنة يحفر فوهات بحثاً عنه. لكن اكتشافه كان صفقة مربحة لرجل آخر جنى في العام 1894 خمسة عشر مليون دولار (أكثر من بليون دولار بقيمة اليوم) من منجم فضة الكومنولث، الذي كان في أريزونا أيضا.

غيرَ أن الحجر النيزكي كان أصغر مما اعتقد بارينغر، وفي كل الأحوال يتبخر معظم الحجر النيزكي عند الاصطدام. لذلك لم يجنِ شيئاً من المال أو ينجح في إقناع أحد بمنشأ الفوهة، حتى بعد انتهاء عملية الحَفْر. توفي بارينغر بنوبة قلبية بعد أشهر معدودة من إيقاف رئيس شركة التنقيب والبحث عن الفوهة الشهابية– مشروع

ساعد بارنغر بإطلاقه– أعمال الفوهات. خسر بارينغر وشركته 600 ألف دولار في التنقيب في الفوهة، ولكنه على الأقل عاش بما يكفي ليدافع عن فرضيته.

ومع تطور علم الكواكب بدأ الناس أخيراً بفهم تشكُّل الفوهات بنحو أعمق، ومال مزيد من العلماء إلى استنتاج بارينغر. جاء التأكيد الأخير في العام 1960، عندما عثر إيوجين ميرل شوميكر Eugene Merle Shoemaker– لاعب أساسي في فهم الاصطدامات بنحو علمي– على أشكال نادرة من السيليكات في الفوهة والتي يمكن أن تنشأ فقط من صخور تحتوي على كوارتز تعرضت لصدمة حادة بفعل ضغط الاصطدام. وفيما عدا حدوث ذلك بفعل انفجار نووي– وهو أمر غير مرجح أنه حدث قبل 50 ألف سنة– فإن الاصطدام النيزكي هو السبب المعروف الوحيد الممكن.

فعلاً، أعد شوميكر خريطة الفوهة بعناية وبيّن التماثل الجيولوجي بينها وبين فوهة ناجمة عن انفجار نووي في نيفادا. رسّخ تحليلُه مفهومَ اصطدام أجرام الفضاء بالأرض وكان علامة فارقة في استيعاب علم الأرض لأهمية تفاعل الأرض مع بيئتها الكونية.

تشكُّل الفوهات الصدمية

تأتي متعتي في تسلُّق الصخور بقدر كبير من سروري في دراسة مادة وبنية وكثافة الصخور– وأنا أتفحص الأسطح من كثَب لتحديد أكثر الطُرق أماناً وفعاليةً. ولكن الكنز الحقيقي المدفون في الصخور هو تاريخها الطويل. إضافةً إلى الدليل على تحرك الطبقات التكتونية الذي تقدمه الصخور، كذلك توفر تركيبة وبنية الصخور كنزاً من المعلومات ليقيِّمها علماء الجيولوجيا. كما يتعلم علماء الأحافير Paleontologists قدراً كبيراً عن تضاريس الأرض وأحافيرها المدفونة.

دائماً ما يحكي تشكُّل الصخور قصةً ما، وبعض المواقع مذهلة من هذه الناحية. في زيارة جامعية إلى إقليم الباسك في بيلبوا، إسبانيا أخيراً، كنت محظوظة جداً بالتقائي زميلاً فيزيائياً أخبرني عن حديقة فليش الجيولوجية Flysch Geoparque في مدينة زومايا المجاورة. الحديقة الجيولوجية هي موقع سياحة طبيعية Ecotourism يجتذب اهتمام الزوار إذ يحتوي على نتوء رائع من الحجر الجيري ظاهر للعيان يقدم أمثلة على ملايين السنين من التاريخ الجيولوجي– والموقع مذهل لسببين: الأول استخدامه للكنز الجيولوجي لتحقيق نمو اقتصادي ثابت، والثاني بسبب النشاطات والاكتشافات العلمية المتنوعة. عندما زرت الحديقة الجيولوجية، أشار المرشد العلمي هناك إلى طبقات صخرية تعود إلى 60 مليون سنة يمكن رؤيتها بسهولة على الجُرف العمودي، الممتد على طول الشاطئ بشكل ساحر. (انظر: الشكل 23). وقد وصف الجرف بأنه كتاب مفتوح يمكن قراءة كل الصفحات في الوقت نفسه. تفصل حدود الطباشيري-الباليوجيني K-T boundary (المعروفة رسمياً حاليا بالحدود K-Pg boundary، والتي سأعود إليها لاحقاً) طبقة من الصخر الأبيض والأحافير عن طبقة أكثر رمادية فوقها من دون أحافير. هذا الخط الذي يشير إلى الانقراض الرئيسي الأخير محفوظ حفظا جيدا في هذا الموقع الهادئ في إقليم الباسك.

ولكن هذه الطبقات المذهلة من الصخور ليست الطريقة الوحيدة لنتعلم عن أحداث الماضي.

فالفوهات الصدمية، التي تعد واحدة من التشكلات المذهلة على سطح الأرض، هي نبعٌ مختلف من المعلومات. على الرغم من معلوماتنا المحدودة عن وقت وطريقة اصطدام نيزك ما بالأرض في المستقبل، إلا أن العلماء يعرفون كثيراً عن جيولوجيا الفوهات الصدمية. يقدم شكل الفوهة وبنية الصخور والتركيب أدلةً تساعد على تمييز الفوهة الصدمية عن الكالديرات (فوهات البراكين) Calderas أو التجاويف الدائرية الأخرى. وما دام يمكن فهم شكل الفوهة الصدمية وتركيبتها المميزة أساسا من أصلها ومنشئها إلى حد كبير، تخبرنا التجاويف وأنواع الصخور المميزة التي صنعها سقوط النيازك الكثيرة عن الأحداث التي صنعت الفوهات بالدرجة الأولى.

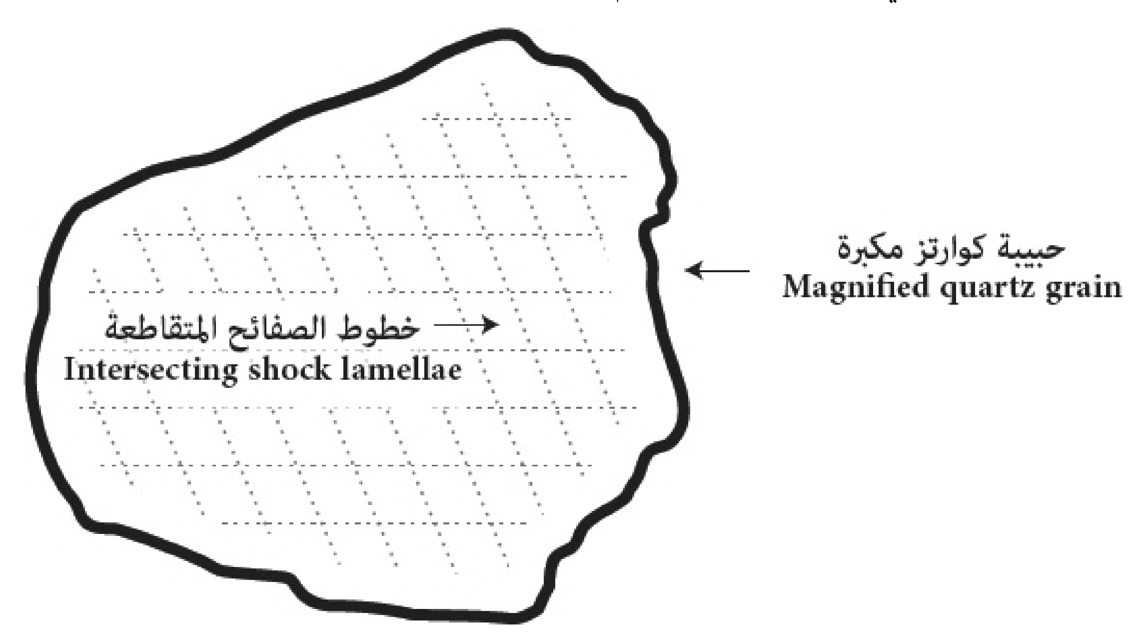
لو لم يسبق وأن ابتذلت السياساتُ العسكرية الفاشلة عبارةَ "الصدمة والرهبة" Shock and awe لكانت الوصف الأصح لتشكُّل الفوهات الصدمية. الفوهات الصدمية هي نتيجة سقوط أجرام من الفضاء الخارجي تضرب الأرض بطاقة كافية لخلق موجة صدمية حفرت فوهة دائرية- وهو أمر مدهش بحق. موجة الصدمة- وليس الاصطدام المباشر- هي المسؤولة عن الشكل الدائري للفوهات الصدمية. وستخلف الفوهة المباشرة تجويفاً يعكس اتجاه الصادم الأول- وليس شيئاً يبدو متماثلاً بشكل دائري. كانت هذه هي الدليل الذي ضلل تحليل غيلبرت بارينغر للفوهة. ولكن لا ينبغي فهم الفوهة ببساطة على أنها صادم يدفع الصخور إلى الأسفل. تنشأ الفوهة عندما يدفع الصادم الأرض بقوة بحيث تتصرف المنطقة المضغوطة مثل المكبس، فيزيل الضغط بسرعة ليحرر الشدة، مرتداً من الصدمة الأولية وقاذفاً المواد نحو الخارج. تحرير الضغط على شكل النمط الكروي للموجة الصدمية هو الانفجار الفعلي الذي يخلق الفوهة. هذا الانفجار تحت السطحي هو ما يولّد الشكل الدائري المميز للفوهة الصدمية.



[الشكل 23] 60 مليون سنة من التاريخ يمكن رؤيتها في صخور حديقة فليش الجيولوجية Flysch Geoparque على شاطئ إتزورم في زومايا، إسبانيا (إهداء من جون أوريستيلا).

عادةً ما تضرب الأجسام التي تشكل فوهات ارتطامٍ الأرضَ بسرعات (بمعدلات تتراوح بين 20 و25 كم/ث تقريباً) تصل إلى ثمانية أضعاف سرعة إفلات الأرض (11) Earth's escape velocity كم/ث. أما الأجرام الأكبر، فتضمن هذه السرعة- التي تعادل عدة أضعاف سرعة الصوت- تحرير كمٍ هائل من الطاقة الحركية Kinetic energy، ما دامت الطاقة الحركية تزداد ليس فقط مع الكتلة بل مع مربع السرعة أيضاً. يولِّد الاصطدام بالصخور الصلبة، الذي يمكن أن يشبه انفجاراً نووياً، موجةً صدمية تضغط كلا من الجرم الآتي من السماء والسطح على الأرض. تسخن الصدمة المتحررة من الاصطدام المادةَ التي تواجهها في طريقها وغالباً ما تصهر وتبخر النيزك الداخل إلى الأرض، وأيضاً- في حال النيازك الكبيرة بما يكفي- المناطق المستهدفة.

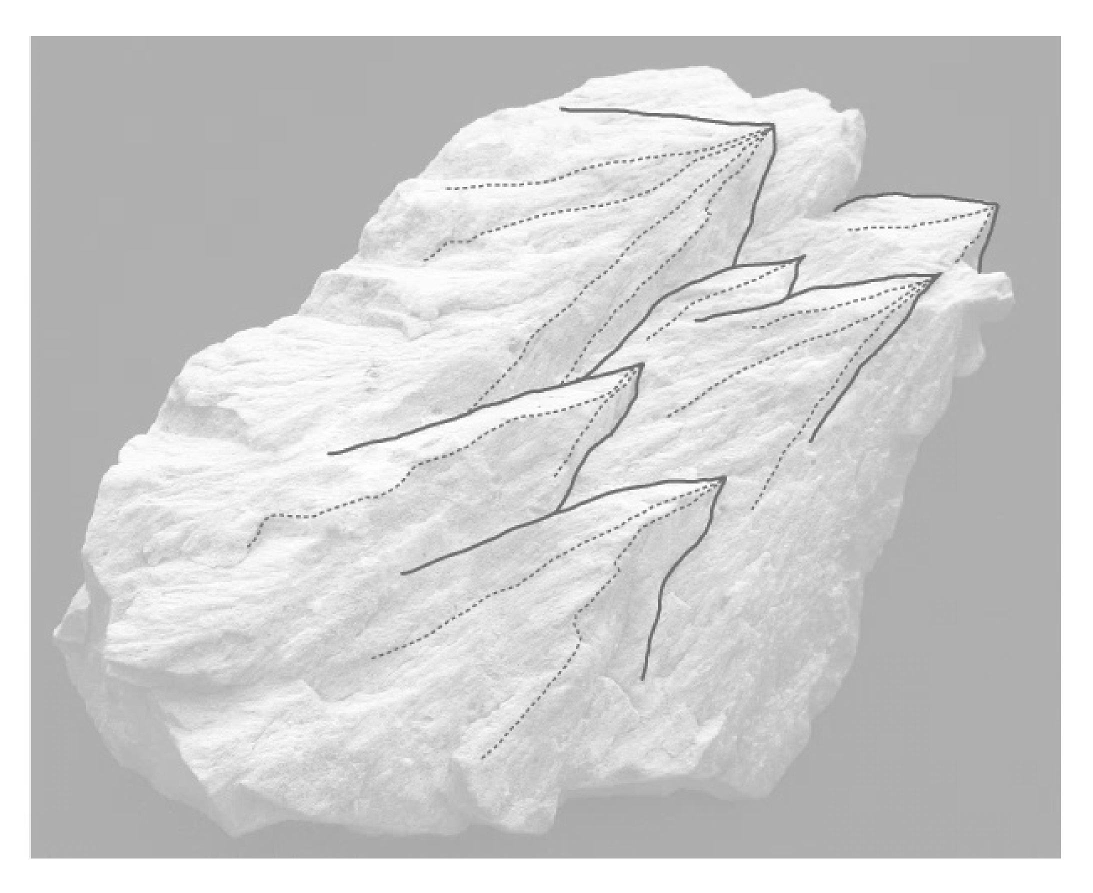
تخلق الموجة فوق الصوتية (سوبرسونيك) Supersonic wave الممتدة مستويات من الضغط تفوق قوة المادة. يخلق هذا الأمر بنية بلورية نادرة، مثل الكوارتز المصدوم Shocked quartz، توجد فقط في الفوهات الصدمية- وفي مناطق التفجيرات النووية (انظر: الشكل 24). تتألف مخاريط التشظي Shatter cones في الصخور، وهي بنى مخروطية الشكل يشير رأسها إلى نقطة الاصطدام، كما هو مبين في الشكل 25. مخاريط التشظي هي دليل واضح على الضغط العالي الذي يعود سببه مجدداً إما إلى اصطدام وإما إلى حادثة نووية. مخاريط التشظي مثيرة للاهتمام من حيث إن طولها يتراوح بين ميليمترات وأمتار، ومن ثم تعرض لنا التأثير الكبير الحجم في المادة. إضافةً إلى تشوه البلورات والدليل من الصخر المصهور، تساعد مخاريط التشظي على تمييز الفوهات التي تمثل فعلاً حوادث اصطدام.



[الشكل 24] نمط التشوُّه المتقاطع المميَّز في كوارتز مصدوم يشير إلى منشأ نيزكي شديد الاصطدام.

الأنواع الأخرى من الصخور التي تعتبر من السمات المميزة للاصطدامات هي تلك التي تتشكل عند درجات حرارة عالية. تُعرف بالتكتايت Tektites والكريات الذائبة بالاصطدام Impact melt spherules، وهي مواد بلورية يعود منشؤها إلى الصخور المنصهرة. ولأنها تنشأ بفعل الحرارة العالية، وليس بالضرورة الضغط العالي، يمكنها أيضاً أن تنشأ في البراكين- عادة هي المنافس الرئيس للاصطدامات في تشكيل الفوهات. ولكن الفوهات الصدمية تختلف عادة من حيث تركيبتها الكيميائية، إذ تحتوي على معادن ومواد أخرى يندر وجودها على سطح الأرض- مثل النيكل والبلاتينيوم والإيريديوم والكوبالت. وهذه الأدلة الإضافية تساعد على إثبات أصل الاصطدام.

كما قد تتسم التركيبة الكيميائية للصادم بخواصَّ مميزةٍ أيضاً. على سبيل المثال، قد تكون بعض النظائر Isotopes - ذرات لها الشحنة نفسها ولكن بعدد بروتونات مختلف- أكثر شيوعا في الأجرام الآتية من الفضاء الخارجي، على الرغم من أن هذا سيكون مفيداً فقط في تعيين نسبة صغيرة من المادة المتبقية لأن معظم المادة الأصلية قد تبخرت.



[الشكل 25] الأشكال المخروطية الملحوظة بأحجام مختلفة تتكرر عدة مرات في الصخرة نفسها وهي دليل واضح على تشكُّل بنية الصخرة بالضغط العالي.

كما تساعد المدملكات (البريشيا) Breccias على تمييز الفوهات، وهي تتألف من أجزاء من الصخور التي تترابط بعضها مع بعض بمصفوفة من مادة دقيقة الحبيبات. إذ تشير هذه أيضا إلى اصطدام شظّى ما كان موجوداً في الأصل. والزجاج المصدوم الملتحم بالانصهار مثير للاهتمام أيضاً من حيث إن تشكُّله يتطلب ضغطاً عالياً وحرارة مرتفعة. وتساعد كثافته العالية عادة في تمييزه عما سواه. ومن السمات المميزة الأخرى لدينا القواطع Dikes المتشكلة على أرضية الفوهة أو الصفائح المركزية Central sheets التي تُبطِّن أرض البنى المعقدة المتشكلة من جسيمات الزجاج.

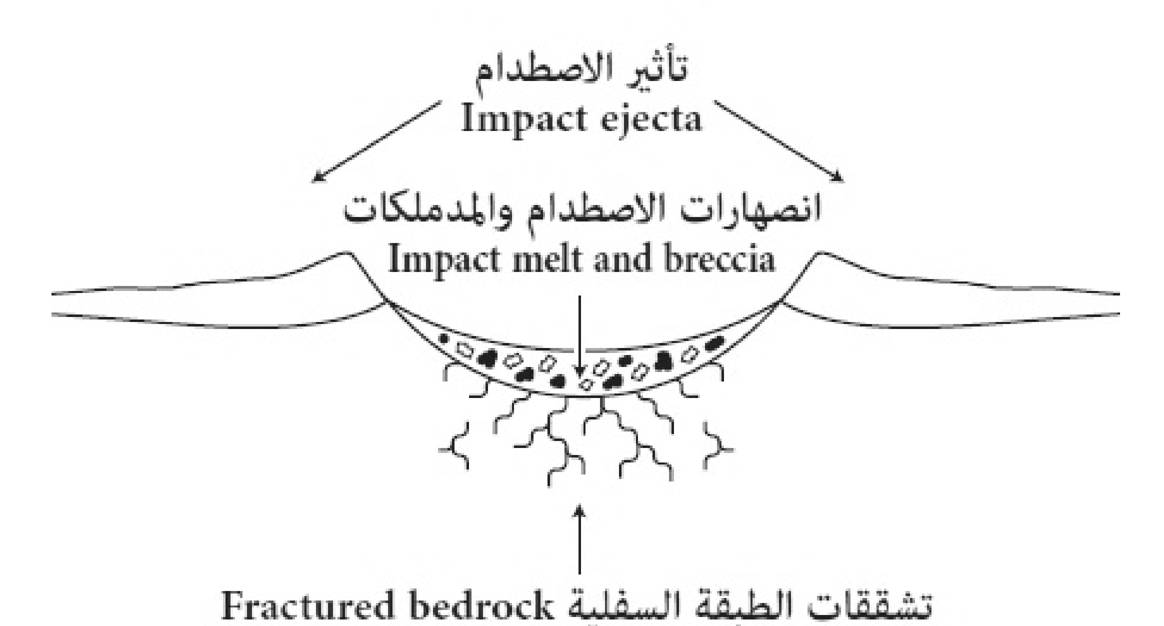
إن خواص الاصطدام والانصهار هذه مهمة جداً في إثبات حوادث الاصطدام وعدم وجود طريقة أخرى قد تتشكل بها مثل هذه الفوهات. لكن، ليس من السهل دائماً العثور عليها لأنها تكون مدفونة عميقا تحت أجزاء الصخور والصهارة. على الرغم من ذلك، تَعرض متاحفُ التاريخ الطبيعي عينات منها. يعجبني الحجر النيزكي آنيغيتو الذي يزن 34 طناً بارتفاع سبع أقدام في المتحف الأمريكي للتاريخ الطبيعي American Museum of Natural History بنيويورك، وهو أكبر حجر نيزكي معروض. وهذه الصخرة الهائلة من المقتنيات اللاحقة للمتحف، وأُضيفت إلى مجموعة الأحجار النيزكية التي اقتناها المتحف منذ إنشائه في العام 1869.

تساعد المواد على تحديد الفوهات الصدمية، وكذلك أشكالها المميزة. وفي حين أن الفوهات الصدمية هي عبارة عن تجاويف تحت سطح المنطقة المحيطة بها، تنشأ معظم الفوهات البركانية من ثوَران البراكين، وتوجد فوق مستوى سطح المنطقة المحيطة بها. كما للفوهة الصدمية حافة مرتفعة– وهو أمر غير مألوف في الفوهات البركانية.

أما طبقات الصخور المقلوبة Inverted stratigraphy– طبقات الحافة المقلوبة– فهي خاصية مميزة أخرى لمنطقة غطاء المقذوفاتEjecta blanket التي تنتج بفعل حَفْر المواد، ومن ثم "قلبها رأسا على عقب" Flipping over إلى خارج الفوهة– تشبه حافة مجموعة من الفطائر البانكيك المرصوصة بعضها فوق بعض. إن التجويف الدائري تقريباً والعميق في سطح الأرض– أو على أي كوكب أو قمر– مع حافة مرفوعة وطبقات صخور مقلوبة هو دليل واضح على أن جسماً عملاقاً ضرب السطح بسرعة هائلة.

مع أن معظم المواد التي تميز الفوهات الصدمية تتشكل أثناء الاصطدام المفاجئ، فإن شكل الفوهة الصدمية يعتمد على تاريخ التشكُّل اللاحق أيضاً. في البداية، عند إصابة هدف، يتباطأ الصادم في حين تزداد سرعة حركة مادة الهدف. تحدث الضربة، والضغط، وزوال الضغط، واندفاع موجة الصدمة كلها خلال بضعة أعشار من الثانية. ولا تكاد تتلاشى الموجة الصدمية، حتى تحدث التغيرات ببطء أكثر. فالمادة المتسارعة التي ضُربتْ– والتي ازدادت سرعتها بفعل الموجة الأولية– تظل تتحرك حتى بعد تلاشي الموجة الصدمية، ولكن في هذه المرحلة تكون الحركة بسرعة أدنى من سرعة الصوت (تحت صوتية Subsonic). ومع ذلك تستمر الفوهة في التشكُّل، وترتفع حافة الفوهة وتقذف مزيداً من المواد. لكن الفوهة لا تكون مستقرة بعد، فالجاذبية ستدفعها إلى الانهيار. في الفوهات الصغيرة، تنخفض الحافة إلى الأسفل قليلاً، ويتجه الحطام إلى أسفل جدار الفوهة، وتتدفق المواد المنصهرة إلى الجزء الأعمق من الفوهة. تكون النتيجة النهائية على شكل وعاء، وتشبه إلى حد كبير الفوهة التي تشكلت في البداية، ولكن قد تكون أصغر بكثير. تكون فوهة النيزك، على سبيل المثال، نصف حجمها الأولي. بعد ذلك، تملأ المدملكات والصخور المنصهرة والمقذوفة التجويف. يوضح الشكل 26 شكل فوهة بسيطة.

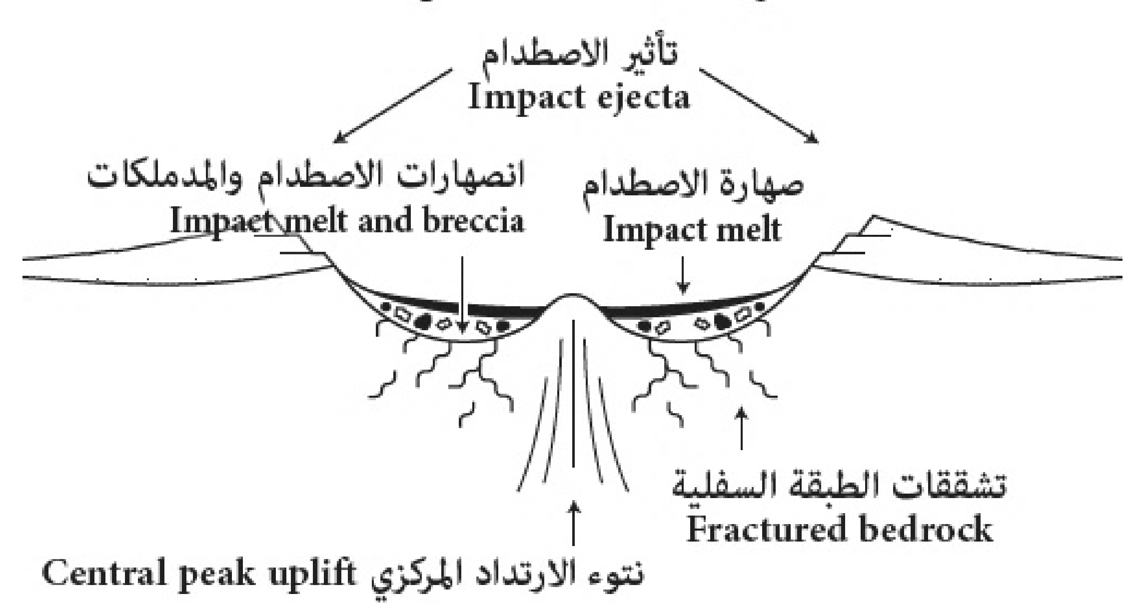
الاصطدامات الأكبر لا تزيح وتقذف المواد فحسب، بل تبخر جزءاً من اليابسة الأصلية المصابة بالارتطام. ويمكن لهذه المادة المنصهرة أن تطلي التجويف من الداخل، في حين تتمدد المادة المتبخرة– لتصنع نتيجة ذلك سحابة على شكل فطر. وسيتساقط معظم المواد الأكبر حجما عبر مساحة تعادل بضعة أضعاف نصف قطر الفوهة. ولكن بعض المواد الحبيبية الدقيقة تتناثر منتشرة حول الكرة الكوكب أو القمر.



[الشكل 26] تتسم فوهة بسيطة تشكلت من اصطدام بمنطقةٌ مركزية على شكل وعاء مغطى بمدملكات سطحية نسبياً وحافة مرتفعة مميزة.

عندما يكون الصادم أكبر من 1 كم، تكون الفوهات المتشكلة بحجم 20 كيلومتراً أو أكثر. يصنع الصادم في هذه الحالة بنحو أساسي فجوةً في الجو، وتملأ المقذوفات هذا الفراغ– صاعدة إلى الأعلى قبل أن تهبط متناثرة على منطقة واسعة. وقد ترتفع المادة الأكثر سخونة إلى ما فوق طبقة الستراتوسفير Stratosphere، ويمكن أن تتبدد كرة النار من المواد المتبخرة بشكل واسع، كما حصل في الصلصال الغني بالإيريديوم الذي خلفه اصطدام الطباشيري-الباليوجيني K-T impact الذي سنستعرضه قريباً.

تُخلّف الاصطدامات الأكبر فوهة معقدة Complex crater (انظر: الشكل 27)، يخضع فيها التجويف لتغيُّرات كبيرة بعد تشكُّل الفوهة الأولية. ترتفع المنطقة المركزية في حين تنهار الحافة جزئيا مع انتشار موجة الصدمة عبر الأرض، وتتفاعل مع الصخور غير المتجانسة لتولِّد موجة جديدة تنتشر في الاتجاه المعاكس للموجة الصدمية و"تفرغ" Unloads حمل الصدمة في الطبقات. تسحب هذه الموجة المُخلْخَلة الموادَ العميقة إلى عمق سطحي مخلفة قشرة رقيقة تحت الفوهة الصدمية الكبيرة. السرعة التي يحصل بها كل هذا هي سرعة مذهلة. فقد تنشأ تجاويف بعمق عدة كيلومترات خلال ثوانٍ، ويمكن أن ترتفع القمم آلافَ الأمتار في دقائق.



[الشكل 27] تتسم الفوهة المعقدة، مثل الفوهة البسيطة، بحافة مرتفعة– ولكن ببنية طبقية– إضافةً إلى منطقة داخلية مرتفعة وكمية أكبر من المواد المنهارة.

للفوهات المعقدة مظهرٌ يختلف عن الفوهات البسيطة التي تشكلها الاصطدامات الأصغر. يعتمد الشكل المحدد للفوهة على الحجم. عندما تمتد فوهة أكبر من كيلومترين عرضاً عبر طبقات صخور رسوبية، أو بعرض 4 كيلومترات عبر صخور بركانية Igneous أقوى أو بلورية متحولة Metamorphic crystalline، عادة ما تكون لها منطقة مركزية مرتفعة وأرضية فوهة مسطحة واسعة، وجدران متجاورة. هذا ما يتبقى بعد الانضغاط الأوليِّ: الفوهات والتعديل والانهيار.

عندما تمتد الفوهة إلى ما هو أكبر من 12 كم عرضاً، قد تنشأ هضبة أو حلقة كاملة في المركز. معظم هذه الأدلة هي معلومات جوهرية عند التنقيب في الماضي (مجازياً وأحياناً حرفياً). كما سنرى في الفصل الثاني عشر، في ثمانينات القرن العشرين ساعدت هذه السمات المميزة على التعرف على فوهة يوكاتان المرتبطة بالانقراض الطباشيري الثلاثي K-T extinction.

الفوهات على الأرض

في الخمسين سنة الماضية عثرنا على عديد من الفوهات الصدمية. وبدراسة تركيبتها الكيميائية إضافةً إلى تركيبة الندبات المعروفة بالأستروبليم (من اليونانية بمعنى ندبات النجوم) Astrobleme– الفوهة المدمرة بغالبها ولكن التي لا تزال تترك آثاراً قابلة للتمييز– يمكننا أن نبدأ بملء سجل زوار كوكبنا. سجل الزوار هو قاعدة بيانات اصطدامات الأرض Earth Impact Database.

تحتوي قاعدة بيانات اصطدامات الأرض على بعضٍ من أكثر القوائم إثارة للذهول من تلك التي قد تجدها على الإنترنت. إذا نظرت فيها، فستجد فهارس لعديد من الأجرام التي ضربت الأرض وخلَّفت ندباً كبيراً بما يكفي للعثور عليها وتحديد الفوهة الصدمية. هذه ليست قائمة كاملة من الصدمات. ولأن كثيراً من الفوهات القديمة على الأرض أزيلت بفعل النشاط الجيولوجي، فإن معظم الفوهات التي نشاهدها نشأت من اصطدامات أحدث وأقل تواتراً.

لعل معظم الضربات حدثت قبل أكثر من 3.9 بليون سنة في المرحلة الأولى من تشكل المجموعة الشمسية عندما انجرفت المواد المتبقية من تشكل الكواكب وتحركت عبر الفضاء. ولكنَّ الأرض، والمريخ والزهرة، وأجساماً أخرى نشطة جيولوجياً فقدت الدليل على وجود هذه الفوهات مع مرور الوقت، ولهذا السبب نراها أكثر وضوحا على القمر الخامل جيولوجياً.

اسم الفوهة	العمر (بملايين السنين)	القطر (كم)
سانت مارتن Saint Martin	220	40
مانيكواغان Manicouagan	214	85
روشيسوارت Rochechouart	201	23
أوبولون Obolon	169	20
بوتشيج كاتونكي Puchezh-Katunki	167	40
موروكينغ Morokweng	145.0	70
جوسيس بلاف Gosses Bluff	142.5	22
ميولنير Mjølnir	142.0	40
تونونيك (برنس ألبرت) Tunnunik (Prince Albert)	128	25
توكونوكا Tookoonoka	115	55
كارسويل Carswell	91	39
نهر ستين Steen River	76.20	25
لاباجارفي Lappajärvi	74.1	23
مانسون Manson	70.3	35
كارا Kara	65.17	65
تشيكشولوب Chicxulub	66	24
بولتش Boltysh	50.50	150
مونتانا Montagnais	49.0	45
كامينسك Kamensk	40	25
لوغانشا Logancha	39	20
هوتون Haughton	36.4	23
ميستاستين Mistastin	35.7	28
بوبيغاي Popigai	35.3	90
تسابيك باي Chesapeake Bay	15.1	40
ريس Ries	5 >	24
كارا كول Kara-Kul	32 ±	52

[الشكل 28] قائمة بالفوهات المعروفة على الأرض التي يفوق قطرها 20 كم والتي نشأت خلال الـ 250 مليون سنة الماضية، من قاعدة بيانات اصطدامات الأرض Earth impact data base. تمثل الأحجام تقديرات الأقطار من الحافة إلى الحافة، التي هي أصغر من منطقة الاصطدام المتأثرة.

بل وقد فُقد الدليل على اصطدامات أكثر حداثة. على الرغم من أنها تحدث بنحو متكرر أكثر نوعاً ما، إلا أن الاصطدامات الصغيرة لا تترك أثراً ملحوظاً- على الأقل وقتاً طويلاً. الواقع أن الفوهات الصغيرة أقل شيوعاً مما قد نعتقد بسبب كثافة الغلاف الجوي للأرض. مثل كوكب الزهرة وقمر تايتان، يحمينا الغلاف الجوي من كثير من الاصطدامات التي تحدث بنحو متكرر على عطارد والقمر، حيث لا غلافَ جوياً يحميها هناك.

لا تحدث الاصطدامات الأكبر إلا نادرا فقط- من حسن الحظ لاستقرار الحياة على الكوكب. قد يحدث اصطدام عنيف بما يكفي ليخلف فوهة بعرض 20 كم، ويسبب أضراراً عالمية مرة خلال ما بين بضع مئات الآلاف من السنين ومليون سنة. ومع ذلك، لا تعكس قاعدةُ بيانات اصطدامات الأرض مثلَ هذا المعدل. إذا نظرت في القائمة، فستجد دليلاً على 43 فوهة فقط من هذا النوع، و34 فقط خلال الـ 500 مليون سنة الماضية، و26 خلال الـ 250 مليون سنة الماضية (انظر: الشكل 28). ونحو 200 بُنية فقط إجمالا.

هناك عدة عوامل تعلل الشح الملحوظ في سجل الفوهات. الأمر الأول هو أن 70% من سطح الأرض تغطيه المحيطات. ليس فقط من الصعب العثور على الفوهات تحت الماء، ولكن يمكن للماء أن يتدخل في تشكُّل الفوهة بالدرجة الأولى. إضافة إلى ذلك، من المحتمل أن يزيل النشاط الجيولوجي في قاع المحيط كل الآثار التي تشكلت إلا الحديثة منها. إلى حد كبير، ينمحي الدليل في قاع البحار كل 200 مليون سنة، بما أن الصفيحة التكتونية تتغير في قاع المحيط في عملية انكماش وتوسع تشبه سيور النقل بحيث تغطي أي دليل سبق أن وجد ضمن هذا المقياس الزمني.

حتى على سطح الأرض، يمكن للنشاط الجيولوجي مثل الحت Erosion بفعل الماء أو الرياح أن يتلف الدليل. هذا أحد الأسباب التي تفسر اكتشاف معظم الفوهات في مناطق داخلية أكثر استقراراً في القارات (والأغلب أن تبقى محفوظة على الكواكب الأقل نشاطاً جيولوجياً مثل الزهرة). وبالطبع، حتى إن لم يكن في الإمكان الوصول إليها على عمق 4 كيلومترات تحت الماء، فإن النيازك قد تسقط في مناطق يصعب الوصول إليها على الأرض أيضاً. أخيراً يمكن أن تغطي العمليات البشرية الأدلة بتغييرها سطح الأرض. لذا من اللافت للنظر، نوعاً ما، أن قائمة الفوهات كبيرة بهذا الشكل.

بعض الأحداث البارزة جديرة بالملاحظة لأنها حديثة (على مقياس زمني جيولوجي). نشأت فوهتان بعرض 10 كيلومترات خلال الـ 10 ملايين سنة الماضية- واحدة في كازاخستان وأخرى في غانا. واثنتان جديرتان بالذكر في جنوب إفريقيا وكندا- فيرديفورت Vredefort وسدبوري Sudbury. وهاتان أكبر من فوهة تشيكشولوب التي سببتها حادثة الاصطدام التي أدت إلى الانقراض الطباشيري الثلاثي K-T extinction، ولكنها تشكلت في الماضي البعيد- قبل بضعة بلايين سنة. أُنشئ منجم سدبوري في كندا للتنقيب عن النيكل والنحاس اللذين تركزا عندما ضرب الجرم العملاق، -الذي أنشأ الفوهة، قشرةَ- الأرض وصهرَها. لم يُلقِ الجرم الصادم في سدبوري معظم المعادن مباشرة في الفوهة، بل صهَر كمية كبيرة من القشرة الأرضية -بحجم بحر- واستغرقت هذه القشرة وقتاً طويلاً لتتبلور. أعطى هذا وقتاً كافياً للكميات الصغيرة من النيكل والنحاس الموجود في قشرة الأرض أن تستقر في قاع حوض الاصطدام المصهور. ومن ثم تركزت المعادن أكثر بفعل نشاط حراري مائي Hydrothermal activity تولد نتيجة صفيحة الاصطدام المنصهرة والساخنة لتنتج خاما قابلاً للاستخلاص اقتصادياً.

يشتهر منجم سدبوري بين علماء فيزياء الجسيمات بسبب وجود مختبرٍ تحتَ الأرض هناك. على الرغم من أنه منجم نشط، إلا أنه موقع تجارب فيزيائية نشط أيضاً. يحمي موقع مختبر سدبوري العميق تحت الأرض- يبعُد كيلومترين تحت سطح الأرض- كواشف Detectors بداخله من الأشعة الكونية Cosmic rays، مما يجعل المختبر مكاناً مثالياً لدراسة النيوترينوات Neutrinos الآتية من الشمس، كما حدث بين العامين

1999 و2006. كما أنه مكان ممتاز للبحث عن المادة المعتمة، وهو هدف عديد من التجارب الجارية حالياً هناك.

ولكن معظم قصص الاصطدامات ليست وردية تماماً. سأشرح قريباً حادثة اصطدام تشيكشولوب Chicxulub الحديثة، التي تبين القدرة الهائلة على التدمير للاصطدامات الضخمة. لكن، قبل استعراض هذه القصة المذهلة عن النيزك الذي أثار الانقراض الطباشيري الثلاثي K-T extinction قبل 66 مليون سنة، فلنتأمل القصة الأشمل عن الانقراضات الرئيسة خلال نصف البليون سنة الماضية، وما تخبرنا إياه عن هشاشة الحياة على كوكبنا واستقرارها.

11

الانقراض

يشرح الانتخاب الطبيعي Natural selection الدارويني الشهير كيف تطورت الحياة. ظهرت أنواع Species جديدة، في حين اندثرت الأنواع التي لم تنجح في التكيف مع التغيرات في بيئتها– أو الوصول إلى بيئة بديلة مناسبة. مع ذلك على الرغم من نجاحاتها العديدة– وهي كبيرة بحق– لا تفسِّر نظرية التطور الداروينية الحياةَ كما نعرفها بنحو كامل؛ فالعنصر المفقود الأكثر أهمية هو أصل الحياة.

يساعدنا داروين على فهم الطريقة التي مهدت فيها بعضَ أشكال الحياة الطريقَ لظهور أشكال أخرى منذ أن بدأت الحياة. ولكن على الرغم من أن مبادئ التطور تساعدنا على فهم بعض الجوانب، فإن أفكار داروين لا تشرح كيف انبثقت الحياة بالدرجة الأولى. على رغم عديد من المقالات والكتب الشائعة عن الموضوع، فإن أصل النشوء هو واحد من أصعب المسائل العلمية التي يمكن التعمق فيها– سواء كان الموضوع بداية الحياة على الأرض أو بداية الكون الذي يحتويها. الأفكار في المراحل التالية من التطور تخضع للمنهج العلمي بحيث يمكن اختبارها– إن لم يكن بالتجارب المُتحكّم فيها Controlled experiments في المختبر، فعلى الأقل بدراسة سجل الأحافير أو السماء الغنية والعتيقة. بيْدَ أن الوصول إلى البداية غير ممكن دائماً. قد يحاول العلماء الميالون إلى الأبحاث النظرية- من الذين يفسرون أو في الغالب يخمنون- أن يعالجوا مسائل أصل النشوء. وقد يحاول بعض علماء البيولوجيا التجريبيين استنساخ عمليات أساسية لتشكُّل الحياة في المراحل المبكرة من المجموعة الشمسية. ولكن على الرغم من هذا التقدم الوليد، تبقى بداية الحياة– على الأقل في الوقت الحالي– صعبة التأكيد.

لكن، ينْصَبُّ تركيزنا في هذا الفصل على ناحية مختلفة لقصة الحياة، ناحيةٍ– مثل بداية الحياة– لم تكن مشمولة بكاملها في نظرية داروين المبدئية عن الانتخاب الطبيعي. ولكن تمتاز هذه الناحية بأنها– مثل مرحلة التطور اللاحقة– قابلة للرصد. هذا العنصر المهم لقصة الحياة يتعلق بكيفية استجابتها للتغيرات الجذرية، التي من بينها الانقراض الجماعي، والتي ماتت فيها -عديد من الأنواع تقريباً في الوقت نفسه، من دون أن تترك ذرية خلفها.

فكرة التدرج Gradualism هي فكرة مركزية في مفهوم داروين الأصلي، فكرة أن التغير يحدث ببطء على مر الأجيال. إن نظرية داروين لم تكن عن التغير الجذري، ومن المؤكد أنها لم تتنبأ بتغيرات نتيجة غارة من الفضاء الخارجي. استندت صورة داروين إلى التطور البطيء، في حين قد تكون الكوارث البيئية مباغتة. تسمح النظرية الحالية للتطور بمزيد من التغير السريع أكثر مما تصوَّره داروين في البداية. إذ وجد عالما الأحياء من برينستون، بيتر وروزماري غرانت Peter and Rosemary Grant، باتباع خطوات داروين، أن مناقير العصافير Finches في جُزُر غالاباغوس تتكيف بسرعة كبيرة مع التغيرات في هطول المطر– أي على مقياس زمني قصير بما يكفي ليرى العالمان التغيرات في زياراتهما المتتالية. ولكن الكوارث تحدث عموما بسرعة كبيرة وبنتائج كارثية تجعل من المستحيل على كثير من الأنواع البقاءَ على قيد الحياة.

تكيفت الديناصورات بالفعل، وبقيت، كمجموعة، ملايينَ السنين. في ظروف أخرى، من المؤكد أنها كانت ستعيش سنين أخرى عديدة. ولكنها لم تستطع التكيف مع الظروف البيئية التي لم تتعرض لها من قبل– والتي سنرى قريباً أنها نشأت بتأثير من الفضاء الخارجي.

تعترف دراسات التطور حالياً بأن التكيف دائماً تقريباً ما يكون عملية بطيئة لتتماشى مع التغيرات البيئية التدريجية. يبدو أن التكيف يؤدي إلى أنواعٍ بسماتٍ مميزة حقا فقط في البيئات المنعزلة. الاستجابة المفضلة لظروف التغيير هي عادةً الهجرة Migration إلى مكان جديد ببيئة أكثر ملاءمة– ولكن فقط إذا كان

في الإمكان الوصول إلى هذه البيئة. عندما لا يتمكن نوع من التكيف أو الانتقال إلى بيئة أكثر ملاءَمة، فإنه يفنى. وفي بيئتنا سريعة التغيير، يجدر بنا أن نأخذ هذا الأمر بعين الاعتبار. على الرغم من التقدمات التقنية، لعل الدرس ذو صلة عند تقييم نتائج الآثار الجيوسياسية المحتملة للبيئة المتغيرة اليوم.

في حكايتنا الكونية، قصةُ الانقراض Extinctions مهمة لنا بسبب الارتباط بين الحياة على كوكبنا والبيئة السماوية والشمسية وربما المجرِّية. من السهل أن ننسى مدى اعتماد وجودنا على الاحتمالات العديدة التي تسمح بنشوء الحياة- وبموتها. يناقش هذا الفصل فكرة الانقراض، وأسبابه، وأكبر خمس حوادث انقراض جماعي، تلك التي مات فيها ما بين نصف وثلاثة أرباع الأنواع (لا يُجمِع علماء الأحافير على تعريف واحد) خلال إطار زمني يمتد عبر عدة ملايين سنة، إضافةً إلى الانقراض السادس الذي قد يكون جارياً الآن.

تربط حالات الانقراض كوكبَنا بأحداث جوية بكلا المعنيين- الطقس والعالم الخارجي. من الصعب التوصل إلى فهم أفضل للارتباطات، ولكن قد يكون الفهم في متناوَل أيدينا. هذا العلم ضروري لنا بوصفنا نوعاً- حتى إن كانت القصص تتكشف عبر فترات زمنية أطول مما يميل معظم الناس إلى التفكير فيها.

حياة وموت

ظهرت الحياة البسيطة في وقت مبكر نسبياً من تاريخ الأرض. فأقدم الصخور على سطح الكوكب تحتوي على الدليل على الحياة من أحافير يعود عمرها إلى نحو 3.5 بليون سنة- بعد بليون سنة تقريباً من تشكُّل الأرض، ومباشرةً بعد أن توقف الهطل النيزكي والشهابي من الفضاء. ظهر البناء الضوئي الأكسجيني Oxygenic photosynthesis بعد نحو بليون سنة- ومعه ظهر غلاف جوي Atmosphere أطلق في الغالب شرارة معظم حالات الانقراض، غيرَ أنه أيضا عجل في ظهور الطحالب متعددة الخلايا Multicellular algae. بعد نحو نصف بليون سنة أخرى بدأت "البليون المملة" Boring billion التي لم تحدث فيها أي تطورات مهمة على حد علمنا بها على الأقل. انتهت هذه الفترة الطويلة والهادئة فجأة مع بداية العصر الكامبري Cambrian period – منذ نحو 540 مليون سنة- عندما تفجَّرت الحياة المُعقَّدة.

يطبق فهمنا المفصل عن التطور منذ التنويع Diversification في العصر الكامبري إلى اليوم- في إطار زمني يعرف بـ دهر البشائر (الحياة الظاهرة) Phanerozoic eon. يحتوي سجل الأحافير على آثار منذ بدايته، عندما ظهرت عديد من الحيوانات صلبة القشرة أولَ مرة وخلفت سجلاً باقياً وصلباً، وظهرت معظم الحيوانات والنباتات. وقد حُفِظت الأحافير في مناطق متنوعة مثل طَفل بورغيس Burgess Shale في سلسلة جبال روكي الكندية، وأخاديد يانغْتزي Yangtze Gorges في الصين، وشمال شرق سيبيريا، وناميبيا. جميعها تحتوي على أدلة عن انفجار أنواع مختلفة من الحياة، كذلك أحافير إيدياكارا Ediacara في أستراليا، وأحافير من نوع ناما Nama-type fossils في ناميبيا، وأحافير من نوع أفالون Avalon-type fossils في نيوفونلاند، وبعض الأحافير من منطقة البحر الأبيض شمال غرب روسيا. تحتوي هذه المناطق الأخيرة على بعض أول أنواع الحياة المعقدة المعروفة- من فترة تسبق الانفجار الكامبري مباشرة.

يقدم سجل الأحافير- إضافة إلى رواية قصة تكاثر الحياة- رؤى عن أوقات اختفت فيها أشكال مختلفة من الحياة، من دون أن تترك أي ذرية وراءها. على الرغم من أن معظم الأحافير التي تسجل الانقراض هي قديمةٌ جداً، فإن فكرة الانقراض هي فكرةٌ جديدة نسبياً. ففي بداية القرن التاسع عشر فقط اكتشف عالم الطبيعة النبيل الفرنسي جورج كوفييه Georges Cuvier الدليل على أن بعض الأنواع اندثرت من الكوكب. قبل كوفييه، عندما وجد آخرون عظام حيوانات أقدم، حاولوا دائماً ربطها بأنواع حية- وهو بالطبع حدساًمنطقي. ففي المحصّلة، الماموثات Mammoths والماستودونات (ماستادون) Mastodons والفيلة Elephants تختلف بعضها عن بعض، ولكن ليس كثيراً بحيث لا تختلط علي؛ في البداية أو على الأقل تحاول أن

تربط بين بقاياها. حل كوفييه الأمر عندما بيَّن أن الماستادونات والماموثات لم تكن أسلاف أي حيوانات حية الآن. واستمر في أبحاثه إلى أن تمكن من تحديد عديد من الأنواع المنقرضة الآن أيضاً.

ولكن على الرغم من أن فكرة الانقراض مبرهَنة برسوخ الآن، فإن فكرة اختفاء نوع كامل قوبلت بكثير من المقاومة في البداية. لا بد أنه كان من الصعب التوفيق بين مفهوم الانقراض والمعتقدات السائدة حينها بقدر ما هو صعب اليوم الاعتقاد بتغيير المناخ بفعل الإنسان. ساعد الجيولوجي الإنجليزي تشارلز لايل Charles Lyell وتشارلز داروين وجورج كوفييه في تسريع تقبل الفكرة– ولكن ليس عن قصد بالضرورة، وحتماً من وجهات نظر مختلفة.

على عكس الآخرين، اعتنق كوفييه وجهة النظر القائلة إن تغيُّرا جذريا في سجل الأحافير كان نتيجة كارثة عالمية. وتلقى دعما قويا لوجهة نظره من ملاحظة أن الصخور في مرحلة التغير السريع في أنواع الأحافير أظهرت علاماتٍ عن أحداث كارثية. ومع هذا لم تكن لدى كوفييه الصورة الكاملة أيضاً. لقد آمن بفكرته بحماس مبالغ فيه وقال إن جميع الأنواع المنقرضة ماتت بسبب أحداث كارثية– من دون أن يدرك أن التغير التدريجي قد يكون أيضاً عاملاً مساهماً. لم يقبل كوفييه نظرية داروين عن التطور، أو أن الأنواع انقرضت عبر عمليات بطيئة وثابتة.

من باب الإنصاف، حتى الآن، يرتبك الناس عندما يشاهدون مناظر طبيعية مثيرة – فهم لا يقدِّرون دائماً العمليات البطيئة التي تساعد على تشكيلها. علق زميل -قدم محاضرة في اجتماع في جنوب غرب كولورادو- أثناء قيادتنا إلى موقع الاجتماع قائلا إنه يتصور أن اضطرابات دراماتيكية ربما هي التي شكّلت جروف الحجر الرملي على جانبي الطريق. لكنني ذكَّرتُه بأن العمليات ذات الصلة قد حدثت على مر ملايين السنين– وإن كان على فترات متقطعة– وليس بطريقة عنيفة كما يتخيل.

في زمن اقتراح كوفييه، ارتكبت معظم المؤسسات العلمية الخطأ نفسه– معارِضة أيَّ دور لتغير كارثي. وإذا كانت فكرة الانقراض صعبة التقبل قبل قرنين، فربما بدت فكرة التغير الكارثي لا تُصدَّق أبداً. كان داروين من بين العلماء الذين فهموا التغير التدريجي، ولكنه استبعد الأفكار الجوهرية في اعتقاد كوفييه. إذ افترض داروين أن أي دليل يتعارض مع التدرج كان ببساطة إشارة إلى عدم ملاءمة سجل الأحافير والجيولوجيا. على الرغم من أنه تقبل التطور بالطبع، إلا أنه افترض أنه حدث دائماً بنحو بطيء جداً يصعب على أي أحد أن يلحظ حدوثه مباشرة. اتبع داروين بتفكيره وجهة نظر تشارلز لايل، الذي ظل حتى النصف الثاني من القرن التاسع عشر يجادل بأن كل التغيرات كانت سلسة وتدريجية، معللاً بأن أي دليل ظاهري قد يشير إلى العكس هو ببساطةٍ بيانات غير كاملة سببها إما فجوات في السجل الجيولوجي وإما الحت Erosion. كما كان لايل بدوره متأثراً جزئيا بعالم الفيزياء الإسكتلندي والمُصنِّع الكيميائي والزراعي والجيولوجي جيمس هاتون James Hutton، الذي اعتقد أن الأرض تغيرت من خلال تغييرات ضئيلة فقط وقد تراكمت عبر فترات طويلة من الوقت لتتمخض، على الرغم من ذلك، عن تأثيراتٍ رئيسة.

إن أفكار هؤلاء العلماء صحيحة بالفعل لعدة عمليات بيولوجية وجيولوجية. فقد حتَّت الرياح والمطر الجبالَ ببطء، والتي بدورها قد تكون نتيجة ارتفاع تدريجي على مدى ملايين السنين من تحرُّك الصفيحة البطيء. ولكننا نعلم الآن أن كلا من التغيرات التدريجية والسريعة ساهمت في تشكُّل الكوكب، على الرغم من أن أكثر التغيرات الجذرية لا تزال تُعَد بطيئة نسبياً من المنظور البشري. هذا أحد الأسباب العديدة لصعوبة إدراك هذه التغيرات.

ولكن بفضل ما نعرفه الآن، يمكننا أن ننظر إلى الوراء ونقول إن الدليل على التغير الجذري يجب أن يكون واضحاً. في أربعينات القرن التاسع عشر، اكتشف العلماء ثغرات في سجل الأحافير مما أشار إلى أحداث كارثية. إذ حدد علماء الأحافير الذين يدرسون السجلات الرسوبية مثلَ هذه الأحداث عندما لاحظوا في بعض الأماكن اختفاء أنواع عديدة من الأحافير فجأة بعد حدٍّ معين من طبقات الصخر، وفوقها دليل على ظهور نوع حي جديد. هذا لا يعني أن الدليل كان دائماً واضحا على الفور، لأن العديد من الظواهر قد تكون السبب وراء

توقف الترسيب ومن ثم استئنافه مجددا بعد فترة من الزمن. ولكن مع تحديد أحداث كارثية معينة متوافقة والتأريخ الدقيق الذي يمكن أن يحدد التوقيت النسبي لترسُّب الطبقات السابقة واللاحقة، تمكَّن علماء الأحافير من حل عديد من المسائل المربكة. مع الوقت أصبح الدليل على التغير السريع أقوى من أن يُدحَض.

تذليل العقبات

دأب العلماء الذي يحاولون إعادة رسم الأحداث الماضية على العمل لتحويل الفرضيات إلى تنبؤات قابلة للإثبات أو الدحض. حتى مع سجل غزير من الأحافير، قد يؤدي عدم اليقين في التحليلات الزمنية أو المكانية إلى فرضيات أو استنتاجات مختلفة جداً. لكي نفهم أسباب بعض النقاشات العلمية المستمرة- وأيضاً لنقدر مدى ذكاء ومنهجية علماء الجيولوجيا والأحافير الذين ذللوا هذه العقبات- لنستعرض بإيجاز بعض التحديات سواء من حيث التحقق بموثوقية من مدى سرعة وقوع أحداث الانقراض ومدى شموليتها من جهة، وفي تحديد الأسباب الكامنة وراءها من جهة أخرى.

العقبة الأولى هي ببساطةٍ صعوبةُ تقييم معدل الانقراض. إن حصر العدد الدقيق للأنواع الحية التي وُجدت على الكوكب في وقت معين أمر صعب لأن العلماء سيحتاجون إلى إيجاد، وتحديد، وتمييز كل نوع من الثدييات والزواحف والأسماك والحشرات والنباتات الموجودة. وهذا ينطبق حتى على حصر الأنواع الموجودة اليوم، وهو ما يجب أن يكون أسهل في الحصر من حيث المبدأ. يتحسَّر عالم الأحياء إي. أو. ولسون E. O. Wilson في كتابه مستقبل الحياة The Future of Life لأن هناك كثيراً من الاكتشافات عن أنواع جديدة تظهر كل سنة إلى درجة يصعب على علماء الطبيعة أن يكتبوا دراسات عنها جميعها.

فُهرِسَ ما بين مليون ومليوني نوع موجود، ويقع أفضل تقدير للعدد الكلي للأنواع بين نحو ثمانية ملايين وعشرة ملايين- على الرغم من وجود بعض التقديرات التي تبلغ خمسة أضعاف هذا العدد- نظراً إلى الفجوة في الزمن ومشكلات ليس فقط في تحديد الحياة في الماضي، بل في تحديد الأحداث الجيولوجية وتأثيرها أيضاً- يصعُب تحديد معدل الانقراض في الماضي أكثر من تحديد عدد الأنواع الموجودة اليوم. في المحصلة يظل حصر عدد الأنواع السابقة والمعدل الذي اختفت به أمراً أكثر صعوبة وتحدياً.

من الأمور التقنية المربكة عند تحديد حالات الانقراض الجماعي بنحو خاص أن الرقم ذا الصلة قد يختلف بحسَب التعريف الدقيق. سأشير في الغالب إلى أعداد الأنواع، على الرغم من أن العلماء يفضلون عادةً أن يحصوا الأجناس Genera، التي يرون أنها طريقة التصنيف الأكثر فائدة. فهمي للتصنيف البيولوجي- المهم لكل من التطور والانقراض- يعتمد بقدر كبير على تحضيراتي لامتحانات المدرسة الثانوية منذ زمن بعيد، عندما حفظت مملكة، شعبة، صف، رتبة، فصيلة، جنس، نوع ببساطة بتكرارها وقتاً كافياً (جرِّبها). على الرغم من ندرة استخدامي لهذه المعلومات، لم أنس هذه المصطلحات قط. يشير هذا التسلسل، الذي قد لا يكون مألوفاً بالنسبة إليك، إلى مدى تقارب الارتباط في أشكال معينة من الحياة.

يكون التصنيف مهماً خصوصاً عند تقييم ما إذا حدث انقراض شامل أو لا. على سبيل المثال، فكِّرْ في ظرف تندثر فيه نصف الأنواع من كل جنس Genus. فقط يحتاج كل جنس إلى نوع واحد لكي يتمكن من البقاء. إذا كان هذا حقاً ما قد حصل، فسيشير عدُّ الأنواع إلى أن حدث الانقراض قد وقع بالفعل إذا كان أكثر من نصف الأنواع قد اندثر، في حين سيشير عدُّ الأنواع إلى العكس إذا لم يتغير هذا العدد نهائيا. هذا المثال، إضافةً إلى النسبة المئوية العشوائية المستخدمة لتحديد حادثة انقراض جماعي- يقول البعض 50% ويقول آخرون 75% - يوضِّح إلى حدٍّ ما الطبيعة المبهمة نوعاً ما للتعريف. وهذا لا يعني القول بأنه يمكن إغفال الانقراض الجماعي – بل إنه لا طريقة مثاليةً لتعريفه.

كما أن وظيفة علماء الأحافير مُثقلة بعوامل أكثر جوهرية من المصطلحات. فمن الضروري تحديد وفهم السجلات الأحفورية المُشوَّشة. وإذا كانت أحافير إحدى الأنواع أو الأجناس تتواتر في طبقات متتالية ومفقودة في طبقات أعلى، فسيبدو أن هذا يشير إلى حدث انقراض. ولكن الأحافير توجد فقط في الصخور الرسوبية. أما الأنواع النادرة التي تعيش في بيئات بركانية أو غير رسوبية فلن تترك أي أثر خلفها. إن الافتقار إلى أجزاء الجسم الصلبة هو إحدى العقبات أمام دراسة أشكال الحياة الأقدم من العصر الكامبري (قبل نحو 540 مليون سنة)، وهكذا فإن التعرف على ترسبات الأحافير من أزمنة سابقة هو أمر أكثر تحدياً.

ولكن السجل الأحدث معقَّد أيضاً. حتى إذا تشكلت الأحافير، قد تتشوش التفسيرات بسبب الاختلاف في معدلات الترسب والحت الضروريان لفهم النتائج المستقاة من الأحافير. الترسبات على اليابسة لا تقع إلا كحوادث متقطعة Episodically في حين يكون الحت ثابتا، أما في بيئة مائية فإن الترسبات مستمرة بثبات Constant والحت متقطع. مما يجعل السجل المائي أكثر شمولاً من سجل اليابسة، الذي هو عموما أقل اكتمالا. تعني هذه العوامل مجتمعةً أن جزءاً فقط من سجل الأحافير بقي حتى الآن، وهذا السجل، حتى عندما يكون موجودا، قد يصعب العثور عليه وتحديده. وسبب نجاح علماء الأحافير هو أنه على الرغم من ضآلة احتمال العثور على أي أحفورة، فإنه مع العثور على ما يكفي من الأفراد مما يكفي من العديد من الأنواع على مدى زمني طويل، سيكون السجل الرسوبي مملوءاً بالأحافير.

مثلُ هذه الأحافير قد تكون آثاراً محفوظة بعناية لفرد بكامله، ولكنها في الغالب سجلات جزئية– دليل يسهل إخفاؤه مغروس في الصخر. ولما كانت الأجزاء الصلبة فقط من نوع ما هي التي تتأحفر، وعادة ما تكون أجزاء الجسم المميزة هي المفقودة، فإن ذلك يؤدي إلى الخلط بين أنواع مختلفة. حتى إن كنا قادرين على تحديد الأحافير كأمثل ما يكون، بيْدَ أن عمليات الحت وغيرها من العمليات على الأرض قد أخفت أو دمرت كثيراً من الآثار قبل العثور عليها بوقت طويل.

إضافةً إلى هذا كله، يمكن أن يشوش تأثير سينيور-ليبس Signor-Lipps effect بين التفسيرات. هذه الظاهرة، التي سميت باسم فيل سينيور Phil Signor وجيري ليبسJere Lipps، ترتبط بالفكرة الحدسية بأن آخر أحفورة لنوع ما ستكون موجودة في أوقات جيولوجية مختلفة في أماكن مختلفة، ما يجعل الانقراض يبدو أقل فجاءة وأكثر تدرجاً مما كان عليه في الواقع. بحسَب سينيور وليبس، الاختلاف في عمق آخر أحفورة باقية فوق منطقة ممتدة مكانياً لا تبرهن بنحو قاطع إذا كان الانقراض قد حدث بشكل تدريجي أو بغتة. قد يصعب تأكيد سبب انقراض معين بفعل هذا الغموض.

يُفضل الباحثون عادة الأحافير المائية لأنها عموما تكون محفوظة بنحو أفضل. في القرن التاسع عشر، كان في الإمكان الوصول إلى المحار والأمونيات والمرجان وغيرها من الأنواع الكبيرة نسبيا، بينما في القرن العشرين، ومع استخدام أدوات متطورة، بدأ علماء الجيولوجيا في استخدام الأحافير المجهرية مثل الفورامانيفرا Foraminifera وحيدة الخلية– المتوافرة بغزارة وشائعة الانتشار والمحفوظة تحت الماء وفي الأحجار الجيرية المدفوعة إلى الأعلى– للحصول على مزيد من المعلومات التفصيلية.

أمر آخر يجدر أخذه بعين الاعتبار عند البرهنة على الانقراض، ألا وهو أن كلاً من سجل الأحافير والعصور المطلقة Absolute ages مهمان أيضا. قد يساعد سجل الأحافير إضافة إلى التكوينات الجيولوجية التي توجَد فيها هذه الأحافير في تحديد العصور النسبية Relative ages. ولأن فترات زمنية مختلفة استضافت أنواعاً مختلفة، فإن أنواع الأحافير الحالية تساعد على تحديد العصور التي تشكلت فيها هذه التكوينات الجيولوجية. ولكن إيجاد العصور المطلقة وليس فقط النسبية لطبقة صخور تقع على الحدود بين الطبقات أمرٌ صعب عادة، ويتطلب طرقاً لتأريخ التكوينات مستقلةً عن سجل الأحافير. إحدى الطرق التي يستخدمها علماء الجيولوجيا لهذا الغرض هي تحليل النظائر Isotopic analysis. في تحليل النظائر يُحدِّد العلماء نسبة نظائر مختلفة من الذرة (حيث يكون عدد البروتونات هو نفسَه، ولكن يختلف عدد النيوترونات) بعضها إلى بعض، مُجادلين بأنه

إذا علمنا المدة التي يستغرقها أحد النظائر ليتحلل إلى آخر، وعلمنا أيضاً ما بدأنا به، يمكننا عندها أن نحدد عمر شيء ما من خلال معرفة ما تبقى من ذرات من نظير ما.

لعل تأريخ الكربون Carbon dating من أفضل الأمثلة على هذا المنهج. إنه يُستخدَم لتحديد عمر مواد عضوية أقدم وهو دقيق فعلاً. لكن نظراً إلى نصف عمر Carbon dating نظائر الكربون، فهي طريقة تأريخ فعالة فقط لأشياء يعود عمرها إلى أقل من 50 ألف سنة، مما يجعلها غير مناسبة لتأريخ الصخور الأقدم في معظم دهر البشائر. تُستخدَم بدل ذلك النظائر الأطول عمراً.

ولكن تحليل النظائر أكثر صعوبة عند تطبيقه على صخور أقدم. عموما، لا تتوافر إلا كميات نَزِرة Trace amounts فقط من النظائر ذات الصلة، ولا يكون تحديد العصر دقيقاً بما يكفي دائماً. على سبيل المثال، تحلُّل البوتاسيوم Potassium إلى آرغون Argon هو عملية مهمة للتأريخ. ولكن قد يتسرب غاز الآرغون من الصخور إلى الجو، مما يجعل الصخور تبدو أصغر عمراً مما هي عليه فعلاً. أو قد يعلق داخل الصخرة عندما تشكلت أول مرة، مما يؤدي إلى مزيد من الآرغون وإلى مظهر أكبر عمراً. وقد تطورت المناهج بنحو بارز في العقود القليلة الماضية إذ إن الترابط بين العناصر المختلفة حسَّن من الدراسات كما أصبحت الدراسات التفصيلية للكميات الضئيلة من العناصر أكثر سهولة. يقدم التأريخ الحديث للنيزك ولحادثة انقراض الطباشيري-الباليوجيني باستخدام الليزر لاستخلاص الغاز من بلورات الآرغون، التي سآتي على ذكرها في الفصل التالي، مثالاً دقيقاً إلى درجة مذهلة.

استُخدِمت المعلومات المغناطيسية أيضاً للمساعدة على تحديد العصور المطلقة. يعتمد هذا المنهج - الذي طُبِّق أولا على الصخور المرتبطة بانقراض الديناصورات- على انعكاسات مغناطيسية الأرض Geomagnetic reversals. ولأن القشرة الأرضية تتألف من صفائح تكتونية متحركة، يتغير اتجاه الحقل المغناطيسي مع الوقت بحيث يصعُب تحديد الاتجاه البدئي، مما يؤثر في مصداقية النتائج. ربما كان ذلك أمراً جيداً إذ عجل عدم ملاءمة المنهج البحثَ عن طريقة أخرى على يد الجيولوجي وولتر آلفاريز Walter Alvarez ووالده، الفيزيائي لويس آلفاريز Luis Alvarez، مما قاد إلى فرضية النيزك التي سأشرحها قريباً.

تفسيرات مقترحة لحالات الانقراض

بلا شك، أظهر العمل الدؤوب لعلماء الجيولوجيا والأحافير أن تغيرات مذهلة حدثت في الماضي محت معظم الحياة على الكوكب. ما كاد يُبرهَن على ذلك، حتى تحول السؤال إلى كيف ولماذا حدث. لقد تعرضنا لعدد من العواصف والكوارث المدمرة في السنوات الأخيرة، ولكن أي واحدة منها بمفردها لم تكن قوية بما يكفي لإزالة نصف الأنواع على الكوكب. بالطبع إن الحُكم النهائي على التأثير التراكمي للتأثير البشري لم يحدَّد بعد. ولكن ما الذي عجل بالكوارث التي غيرت العالم والتي حدثت في الماضي؟

قبل التحول إلى قائمة من الأحداث الكارثية التي يمكنها أن تقدح شرارة الانقراض، فلنتأمل أولاً القائمةَ الأقصر من العناصر البيئية التي قد تؤدي دوراً. الحرارة أو التغيرات في هطل الأمطار (في أي من الاتجاهين) هما مساهمتان مهمتان. عموما، الأنواع التي تكيفت مع بيئتها المحلية ليست بالضرورة قادرة على التكيف عندما تتغير أحوال الطقس.

أما في حال ذوبان الجليد في القطب الشمالي، فقد تتغير البيئة بالنسبة إلى أنواع معينة تغيرا دراماتيكيا استجابةً للحرارة المتغيرة، بحيث تضطر أنواع موجودة، لا تستطيع أن تتكيف بسرعة كافية، إلى الانتقال نحو موئل Habitat أكثر ملاءَمة- وإلا فستفنى. بالطبع للتغيرات المناخية تأثيرات غير مباشرة- من أهمها التغير في مستويات سطح البحر، الذي قد يدمر البيئات المائية المستقرة، ويفيض على مناطق أرضية مأهولة- ما يحوِّل البيئات الأرضية إلى بيئات محيطية ومن ثم يبيد بعض الأنواع التي تعيش على اليابسة.

تسخين المحيطات قد يؤثر في نمط هطل المطر أيضاً- مجدداً ما يؤثر في فرصة الأنواع في البقاء. أما على مقاييس زمنية أقصر، فقد تساهم الطفيليات أو الأمراض- الأخطار التي يمكن أن تتفاقم بتغير المناخ- في الانقراض. وقد يموت الطعام الذي يعتمد عليه النوع، مثيراً تفاعلاً تسلسلياً في السلسلة الغذائية.

في المحيطات يكون التغير في الحمضية Acidity هو آليةَ قتل محتملة أخرى، كذلك نفاد الأكسجين. أخيراً، قد يكون تشكُّل الحواجز التي تؤدي إلى كتلة سكانية معزولة وضعيفة، أو إزالة الحواجز التي قد تسمح بدخول أنواع عدائية أو تجانس مفرط في الكتلة السكانية، عاملين آخرين من شأنهما أن يؤديا إلى هلاك نوعٍ من الأنواع. أي محفز انقراض يسبب واحداً على الأقل من الكوارث التي ذكرتُها أعلاه، ولكن معظمها سبَّبَ عديداً من الكوارث معا.

ولكن لمَ تحدثُ هذه التغيرات؟ وما التغير البيئي وراء حدوثها؟ تهيمن وجهتا نظر متنافستان على الأفكار في هذا الموضوع. إحداهما أنها حدثت تدريجياً- وجهة نظر ترتبط عادة بالظواهر المتصلة بالأرض مثل البراكين والصفائح التكتونية. فالغبار والسخام اللذان يطلقهما البركان قادران على حجب ضوء الشمس وإنتاج تغيرات رئيسة كافية في الجو لتؤثر في الحرارة. ولكن قد يستغرق الأمر مدة قبل أن تفنى أشكال الحياة نتيجة لذلك. الصفائح التكتونية، التي يمكنها أن تؤثر في الموائل والبيئات، هي سبب مقترَح آخر للإبادة التدريجية للأنواع. وإضافةً إلى التغيرات في المحيطات، يمكن أن تؤثر الصفائح التكتونية في المناخ وفي غطاء اليابسة، وكلا الأمرين قد يؤدي إلى تغيرات بارزة في الحياة على الكوكب. بالطبع فإن كلا من النشاط البركاني أو الصفائح التكتونية مرتبط بالانقراض، إذ غالبا ما يحدثان معاً عموما.

ثم هناك "الأحداث الكبيرة" Big events. تشتمل وجهة النظر المعارضة هذه على كوارث خارجية مفروضة من العالم الخارجي مثل اصطدامات نيزكية ضخمة، ولكنها قد تشمل أيضاً أحداثاً أرضية مدمرة إذا حدثت بنحو مفاجئ بما يكفي. تتضمن الاقتراحات عن الأحداث الأرضية كوارثَ تعتمد على ظواهر معروفة من شأنها أن تتجلي فجأة بسرعة متزايدة. على سبيل المثال، نعلم أن البراكين تثور في فترات متقطعة، ولكن في سيبيريا وعلى هضبة الدكن في جنوب الهند، تتمدَّد طبقات الحمم البازلتية على مناطق شاسعة تُدعى المصاطب. تحتوي المصطبة على طبقات من الحمم تمتد لتشكل هضبة كبيرة، وهي نشأت من معدلات ثوَران بركاني عالية أطلقت كميات هائلة من الحمم التي انتشرت على مساحة واسعة. إن مصاطب سيبيريا والدكن علامات على النشاطات البركانية العنيفة ومعدلات ثوَران أكثر من المعتاد. حتى اليوم، على الرغم من الحت، تحتل الحمم في مصاطب سيبيريا مليون كيلومتر مربع على الأقل وبحجم يعادل بضع مئات الآلاف من الكيلومترات المكعبة.

مثل هذا الرماد الذي نجم عن هذا النوع من النشاط البركاني المكثف الذي شكل المصاطب قد يسبب أضراراً جسيمة. لعلك تتذكر من التقارير الإخبارية كيف يمكن للرماد أن ينتشر بكثافة تكفي ليتدخل في عمل الطائرة، كما حدث في أبريل 2010 عندما ثار البركان ايافيالايوكل Eyjafjallajökul في آيسلندا. كما قد يؤدي النشاط البركاني الأكثر عنفا تأثيرات عالمية أشد حدَّةً، مثل تغيرات عميقة في مناخ الكوكب. تطلق الثوَرانات كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكبريت. مما قد يزيد من بخار الماء في الطبقات العليا من الغلاف الجوي ويساهم في تأثير الدفيئة، ومن ثم يؤدي إلى احتباس حراري على المقياس الزمني القصير. أما على المقاييس الزمنية الأطول، فقد تسبب هذه البراكين نفسها تبريداً عالمياً. ذلك لأن ثاني أكسيد الكبريت المنتشر بسرعة يرتبط مع الماء ليصنع حمض الكبريتيك Sulfuric acid. يتكثف هذا بدوره ليشكل ضباباً كبريتياً رقيقاً يعكس أشعة الشمس مجدداً إلى الفضاء، ومن ثم تبرد طبقات الغلاف الجوي السفلية. (وهذا الأمر فعال جدا إلى درجة أن بثّ الكبريت في الجو عمداً هو إحدى الاستراتيجيات التي يدرسها العلماء لهندسة الطقس استجابةً للتغير المناخي). وقد يُتلف الضباب الكبريتي طبقة الأوزون في الغلاف الجوي، ويؤدي إلى أمطار حمضية. وقد تؤدي تأثيرات التغذية العكسية Feedback effects- المعروفة وغير المعروفة- إلى ظواهر مناخية تدوم أطول.

لكن النشاط البركاني وحده لن يُفسِّر الانقراض. فمن النادر وقوع ثَوَران بركاني مكثف يكفي ليدمر أغلب الحياة على الأرض. أما الاقتراحات الأكثر غرابة لحدثٍ يسبِّب انقراضاً كارثياً وسريعاً فهي تُركز على الأحداث الكونية. كذلك تحدث تغيرات في محور الأرض ومدارها، وهي مسؤولة عن بعض التغيرات المناخية، مثل العصور الجليدية، التي وقعت على مقياس زمني يمتد بين عشرات ومئات الآلاف من السنين، ولكن حركات الأرض هذه قد لا تفسِّر الأحداث التدميرية الشاملة التي تحدث بوتيرة أقل بكثير.

اقتُرحت الأشعة الكونية والسوبرنوفا (المستعرات العظمى) Suppernovae والاصطدامات الكونية Cosmic impacts بوصفها جناةً محتمَلين مع احتمال كونها ذات صلة على المقاييس الزمنية الأطول. مثلا، يمكن أن تؤثر الأشعة الكونية في غطاء الغيوم بعدة طرق، إحداها تأيين الذرات في غلاف التروبوسفير Troposphere بحيث يمكن لقطرات الماء أن تتجمع حول نواة (تُنوَّى) Nucleate في الجوار. ويمكن لهذا الأثر أن يعزز تشكُّل السحب، التي قد تؤثر بدورها في طقس الأرض. لكن، قد لا تكون هذه النظرية صحيحة. أولاً، نحن لا نعلم مدى أهمية الأشعة الكونية مقارنةً بمصادر التأيين المحتملة الأخرى. ثانياً، حتى عندما تتشكل، تحتاج النواة إلى أن تكبر بقدر كبير بالتكثف قبل أن تشكل فعلاً السحب. ثالثاً، تأثير السحب ليس واضحاً- يمكنها أن تُبرِّد الأرض بعكسها ضوءَ الشمس أو، قد تُسخِّن الأرض أكثرَ من خلال إعادة إرسال بعض الطاقة نحوها. على أي حال، فإن الارتباطات Correlations التي قِيسَت بين الأشعة الكونية والمناخ لا تكفي لتفسير التغيرات الهائلةِ خلال فترة زمنية قصيرة والضروريةِ لتعجيل الانقراض.

كذلك اقترح البعضُ السوبرنوفا كمحفزات خارجية محتمَلَة للانقراض. تتعلق الآلية المقترحة بالأشعة السينية النشطة والأشعة الكونية التي تبثها السوبرنوفا. يمكن لهذا الإشعاع من حيث المبدأ أن يقتل الحياة مباشرة بتدمير المادة الجينية والخلوية. كما قد يستنفد Deplete الإشعاعُ طبقةَ الأوزون أو يؤدي إلى تشكُّل ثاني أكسيد النتروجين Nitrogen dioxide، الذي سيؤدي بدوره إلى تبريدٍ عالمي وذلك بامتصاصه ضوءَ الشمس.

لكن، على الرغم من هذه الأخطار المحتملة، من غير المرجح أن تفسر السوبرنوفا حالات الانقراض، للسبب نفسه الذي قد تشك فيه: سوبرنوفا قريبة بما يكفي لتُسبب مشكلات بارزة لا تحدث بتواترٍ كافٍ. وعلى الرغم من أن معدل السوبرنوفا يزداد عندما تمر الأرض عبر الأذرع الحلزونية للمجرة حيث تكون كثافة السوبرنوفا أكبر، إلا أن احتمال مرور الأرض بالقرب منها احتمال ضئيل ليُبرر أحداث الانقراض. على نحو مماثل، لا تحدث انفجارات أشعة غاما بتواتر يكفي لتفسير معظم حالات الانقراض. فهي، بحسب بعض التقديرات، تحدث في درب التبانة مرةً واحدةً فقط كل بليون سنة تقريباً.

المرشح الأقوى لمحفز انقراض كوني هو مذنب أو نيزك يضرب الأرض. يمكن لجرم عملاق يضرب الكوكب أن يسرِّع التغيرات المفاجئة على اليابسة وفي الجو وفي المحيطات. فإذا ضرب الأرضَ شيءٌ ضخم بما يكفي، فستليه تغيرات رئيسة- مميتة بالنسبة إلى بعض الأنواع- تؤثر تأثيرا مباشرا في سطح الأرض ومناخها.

في الواقع، في معظم سيناريوهات أفلام الكوارث الناجحة (باستثناء سيناريوهات نهاية البشرية على يد الزومبي)، تدور في أعقاب اصطدام كبير بما يكفي. يخلق الاصطدام بحد ذاته انفجاراتٍ صدمية، حرائق، زلازل، تسونامي. يمكن أن يحجب الغبار الغلافَ الجوي، مما يحول دون البناء الضوئي Photosynthesis مؤقتا ويبيد غالبية مصادر الغذاء لمعظم الحيوانات. والتغيرات المناخية الناتجة عن اصطدام تعيث في الأرض فسادا- بالتسخين في البداية يعقبه التبريد ربما تسخين إضافي بعد ذلك. ينجم التبريد من الكبريت والغبار اللذين يبقيان عالقين في الغلاف الجوي، بينما التسخين الثاني هو نتيجة محتملة لغازات سامة تحتجز الحرارة وقد تُسبب احتباساً حرارياً.

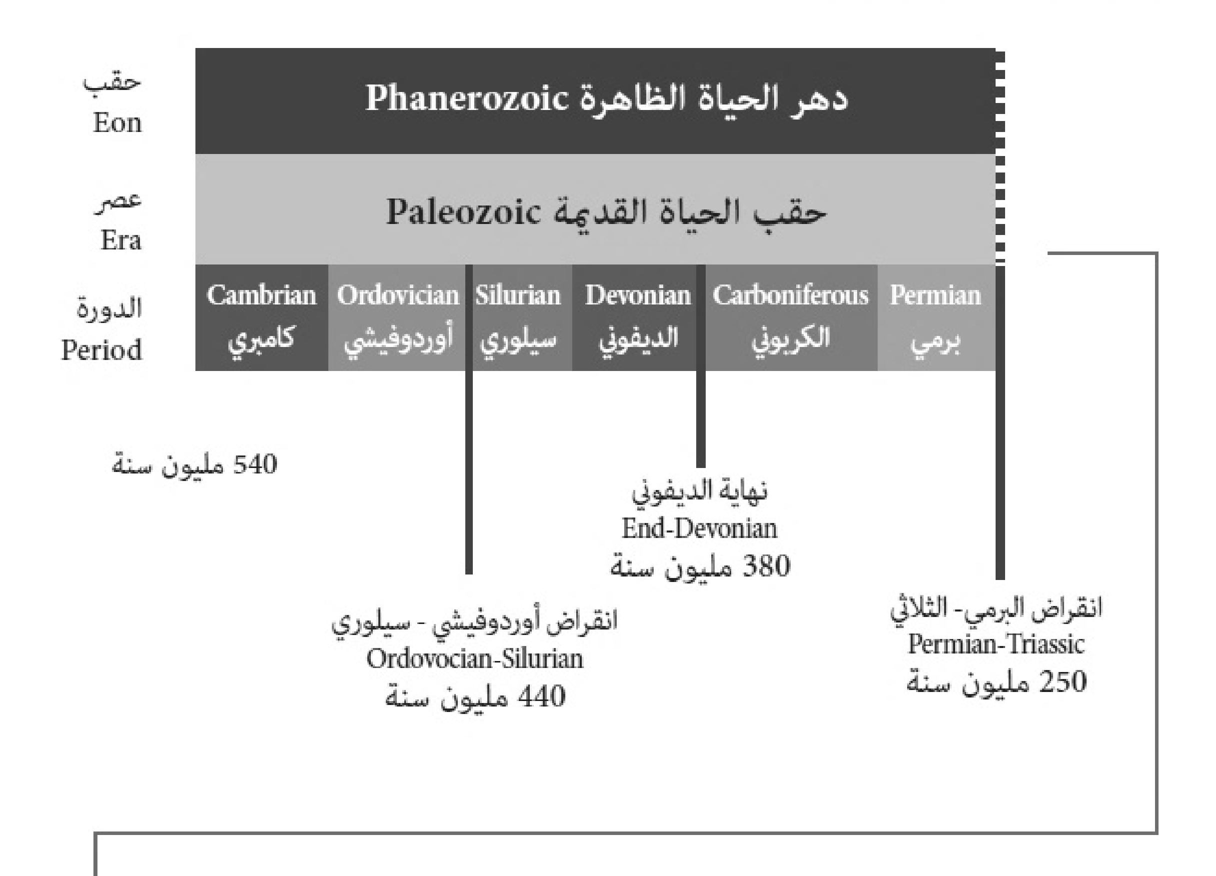
نيزك واحد على الأقل قد سبب بالفعل حالة انقراض واحدة سيشرحها الفصل التالي بالتفصيل. كانت هذه الكارثة إحدى خمس حالات انقراض حدثت خلال دهر البشائر.

الخمسة الكبرى

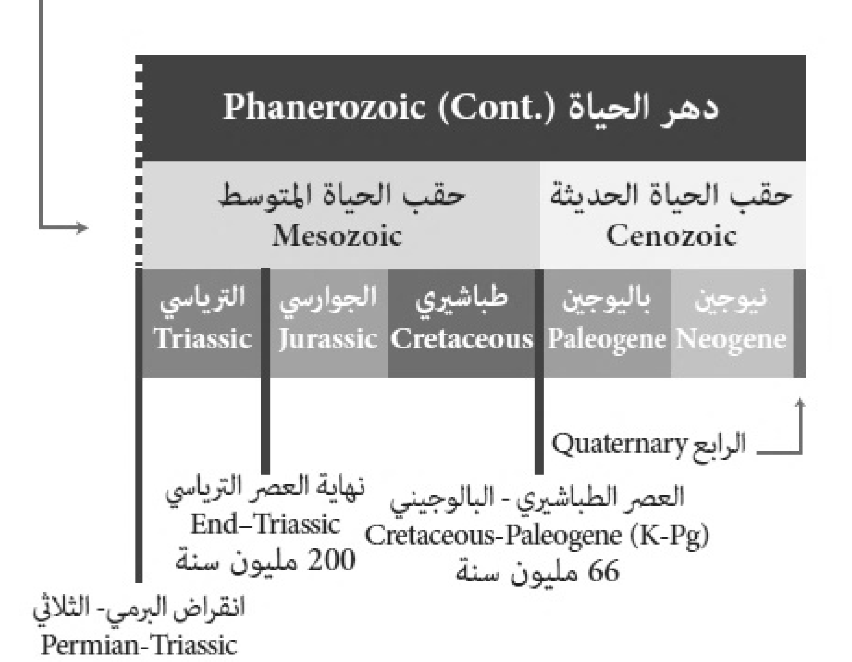
في العام 1982، أحدث عالما الأحافير من جامعة شيكاغو University of Chicago جاك سيبكوسكي Jack Sepkoski وديفيد إم. راوب David M. Raup ثورةً في مجال علم الأحافير بتحليلهما الكمي Quantitative analysis الرائد لكامل البيانات الموجودة في هذا المجال. كانت دراستهما الحسابية والموجَّهة بالبيانات مُربكة نوعا ما بسبب قصور في الملاحظات الرصدية- وعديد من القرارات الضرورية التي يتعين اتخاذها لإقرار ما يجب أن يشتمل عليه التحليل وكيف. ولكنهما، أدركا أن الإحصاء قد يكون مفيدا حتى عندما يُطبَّق على بيانات ناقصة إذا توافر منها ما يكفي، وهكذا كانت الحالة بالفعل. على الرغم من أن دراسة راوب وسيبكوسكي في العام 1982 لم تكن الدراسة الكمية الأولى المعتمِدة على سجل الأحافير، إلا أنها أعادت توجيه دراسة حالات الانقراض، التي استندت في السابق إلى السرد والدراسات في نطاق صغير.

في بحثهما، حدد عالما الأحافير من شيكاغو خمسة أحداث انقراض جماعي رئيسة (انظر: الشكل 29) ونحو عشرين حدثا أقل، مات فيها نحو 20 في المئة من أشكال الحياة. وبسبب الاختلافات الكبيرة في ديناميكيات التطور وقلة الأدلة على المرحلة المبكرة وتدني موثوقيتها، ركز راوب وسيبوسكي على الحياة- ودمارها- خلال الـ 540 مليون سنة الماضية. كما أن أشكال الحياة ظهرت واختفت حتماً قبل الانفجار الكامبري أيضاً. ولكن سجل الأحافير المتقطع يجعل إحصاء الأنواع من أوقات مبكرة جداً أمراً صعباً جداً.

شكل الانقراض الجزء الأول



شكل الانقراض الجزء الثاني



[الشكل 29] حدود الانقراض الرئيسية الخمسة: الانقراض الأوردوفيشي- السيلوري قبل نحو 440 مليون سنة، الانقراض الديفوني المتأخر قبل نحو 380 مليون سنة، الانقراض البرمي الثلاثي قبل 250 مليون سنة، الانقراض الترياسي النهائي قبل نحو 200 مليون سنة، والانقراض الطباشيري-الثلاثي قبل نحو 66 مليون سنة. يبين أيضاً عصور وحقبات دهر الحياة الظاهرة "دهر البشائر".

أقدم حدث رئيس حدده العالمان هو الانقراض الأوردوفيشي السيلوري، الذي حدث في وقت ما بين 450 و400 مليون سنة. في ذلك الوقت كانت جميع أشكال الحياة تعيش في المحيط، لذا فإن معظم الأنواع التي انقرضت كانت مائية. حدث هذا الانقراض الجماعي– الثاني فتكاً- الذي انقرض فيه نحو 85% من الأنواع– على مرحلتين خلال 3.5 مليون سنة. يبدو أن السبب كان في البداية انخفاضَ درجات الحرارة وتجمُّداً شاملاً أدى إلى انخفاض مفاجئ في مستوى سطح البحر. يحصل هذا الانخفاض عندما يصبح الماء محصوراً كجليد– على عكس ارتفاع مستوى الماء الذي سيحدث في المستقبل القريب عندما تذوب الكتل الجليدية، ويتحول الجليد إلى ماء. لعل حالة الانقراض الثانية كانت بسبب فترة احترار لاحقة أبادت الحيوانات التي تكيفت مع البرد. كانت الحيوانات المتكيفة مع الحرارة مثل البلانكتون Plankton الاستوائي، زنبق البحر Crinoids (سلف نجم البحر Starfish وقنفذ البحر Sea urchins) وثلاثية الفصوص Trilobites ولوحيات الأدمة (درعيات الجلد) Armored fish، والمرجان Coral كانت أول ما اندثر، ثم الفئة المتكيفة مع البرد من المرجان وثلاثية الفصوص وعضديات الأرجل Brachiopods انقرضت بعد ذلك.

استمر الانقراض الجماعي التالي فترة طويلة– نحو 20 مليون سنة– وبدأ قبل نحو 380 مليون سنة في المرحلة المتأخرة من العصر الديفوني قرابة التحول من الديفوني إلى الكربوني Devonian-Carboniferous transition. ويبدو أنه كان هناك عدد من الانقراضات– العدد غير مؤكد ولكن تتراوح الاقتراحات بين 3 و7– استمر كل منها نحو بضعة ملايين من السنين. أصاب هذا الحدث الحياة المائية إصابة شديدة أيضاً، فنفق قسمٌ كبير من الأنواع التي عاشت في المحيطات. ونجت الحشرات والنباتات والبرمائيات الأولية على اليابسة، على الرغم من أن الانقراض كان مستفحلاً هناك أيضاً. ويعتقد علماء الأحافير أن إحدى السمات المميزة لهذا الانقراض الجماعي هو أنه حدث لأن معدل الانتواع Speciation rate كان منخفضا جدا بحيث لم يتمكن من التعويض عن المعدل الثابت المتوقع لهلاك الأنواع، الذي لم يكن بالضرورة أعلى من المعتاد.

كان حدث الانقراض البرمي-الترياسي Permian-Triassic (P-Tr) event قبل نحو 250 مليون سنة أكثر حوادث الانقراض المعروفة إبادةً من حيث نسبة الأنواع التي اختفت من فوق الكوكب. ازدهرت الحياة، بما فيها البرمائيات والزواحف على اليابسة وفي البحر مدةً طويلة بعد الانقراض الديفوني، ولكن وُضع حد لذلك في أثناء الانقراض البرمي الترياسي، عندما فني 90%، وربما أكثر، من الأنواع على اليابسة وفي الماء. امتدت الإبادة من البلانكتون السطحي إلى الأنواع التي تعيش في الأعماق مثل البيروزوا bryozoans والمرجان الثابتة والمحار في مكانها وثلاثية الفصوص– أي الأنواع التي نجت من حادثتي انقراض كبريين. أما على اليابسة، فحتى الحشرات أُبيدت– المرة الوحيدة التي عانت فيها انقراضاً جماعياً. إضافةً إلى ذلك، اختفى جزء كبير من البرمائيات، وفقدت الزواحف التي ظهرت فقط بعد الانقراض السابق معظمَ أنواعها أيضاً.

لا يزال سبب الانقراض البرمي الترياسي موضوعَ نقاش، ولكن من شبه المؤكد أن التغير الهائل في المناخ وتغير كيمياء الجو والمحيطات قد أديا دوراً في ذلك. وعلى الرغم من عدم وضوح الآلية والسبب، فإن ارتفاع درجات الحرارة بنحو ثماني درجات سيليزية في الغالب كانت جزئيا على الأقل السببَ في نشاط بركاني كبير في سيبيريا نجمت عنه كمية هائلة من ثاني أكسيد الكربون وانطلاق الميثان من مصاطب سيبيريا. من شبه المؤكد أن الانقراض البرمي الترياسي– أكبر حدث انقراض معروف– هو نتيجة جزئية لهذه الغازات المنبعثة من البركان والتي أدت إلى تسخين الكوكب، وأجهدت المحيطات، وخفضت مستويات الأكسجين، وسممت الجو. حتى اليوم، وبعد كثير من الحت، تمتد حمم مصاطب سيبيريا على مليون كيلومتر مربع على الأقل، ويصل حجمها إلى بضع مئات الآلاف من الكيلومترات المكعبة. في ذلك الوقت كانت المصاطب تقريباً بحجم ما هو روسيا اليوم.

على الرغم من أن الحياة شارفت على الانتهاء، إلا أن مصائب قوم عند قوم فوائدُ. إذ حلت السراخس والفطريات محل الحياة النباتية السابقة وظهرت نباتات جديدة. لم تعد الزواحف الشبيهة بالثدييات سائدةً بعد هذه الفترة. ولكن تطورت منها مجموعة الثدييات الحديثة. وكان ظهور الأركوصورات Archosaurs نتيجة مهمة، أدت في النهاية إلى سيادة الديناصورات.

أرتني صديقة لي أخيراً أحفورة بطول 6 بوصات محفوظة بنحو جيد- ولطيفة الشكل- قالت إنها ديناصور عمره 300 مليون سنة. لو أنها أرتني إياها قبل سنة، لكنت تأملتُ التفاصيل ببساطة فقط لا غير. ولكن في ضوء بحثي الحديث علمت أن الوصف لا يمكن أن يكون صحيحاً لأن الديناصورات ظهرت فقط في العصر الترياسي، أقل من 250 مليون سنة مضت. ولأنني مفتونة بفكرة أن تكون ديناصوراً بالفعل، اقترحتُ أن الأحفورة قد تكون أصغر سنا بقليل. ولكن تبين أن الخطأ كان أمراً مختلفاً: كان عمر الأحفورة 300 مليون سنة حقاً، ولكنها لم تكن ديناصوراً- كانت ميزوصور Mesosaurus: نوعاً من الزواحف المنقرضة. أحافير الديناصورات قديمة- ولكن ليس بقدم صخرتها الرسوبية المحفوظة بعناية.

نظراً إلى جسامة كارثة الانقراض البرمي الترياسي، لم تتعافَ الحياةُ على الأرض بسرعة. نحن نعلم هذا لأن الطَّفْل الأسودBlack shale، الذي يمتد عدة مترات فوق الطبقة الرسوبية الحدودية التي تحدد الانقراض، يُظهِر غياباً مطولاً لأشكال الحياة المنتجة للجير الأبيض. وعلى الرغم من ذلك، بعد خمسة ملايين سنة على الأقل، ظهرت أشكال جديدة من الرخويات والأسماك والحشرات والنباتات والبرمائيات والزواحف والثدييات المبكرة والديناصورات. ولكن خلال 40 أو 50 مليون سنة اضطربت الحياة بسبب الانقراض الجماعي الرابع، الذي حصل قبل نحو 200 مليون سنة.

انقرض 75% تقريباً من الأنواع في هذا الانقراض في نهاية العصر الترياسي الذي سبق العصر الجوراسي. سبب هذا الانقراض غير مؤكد، ولكن ربما كان لانخفاض مستوى سطح البحر وبداية التصدع البركاني الذي نجم عنه في النهاية المحيطُ الأطلسي دورٌ في الانقراض. أُبيدت معظم الفقاريات المفترسة في المحيط كما تضررت أنواع من الإسفنجيات والمرجان وعضديات الأرجل والنوتليديات Nautiloids والأمونيات Ammonoids أيضاً. كما أباد هذا الانقراض معظم الكائنات التي تشبه الثدييات، وعديداً من البرمائيات الضخمة، والأركوصورات من غير الديناصورات.

ومع زوال أي منافسة حقيقية على اليابسة سادت الديناصورات. الانقراضات تدمر الحياة، ولكنها أيضاً تعيد ضبط شروط تطور الحياة. يشتهر العصر الجوراسي التالي من خلال الكتب والأفلام التي سُميت باسمه، حتى إن لم تكن جميع الكائنات في فيلم الحديقة الجوراسية Jurassic Park قد عاشت خلال هذه الفترة. ولكن العصر الجوراسي هو حقاً العصر الذي سادت فيه الديناصورات- وهيمنت على النظام الإيكولوجي على اليابسة في الفترة المتأخرة من العصر الجوراسي. فقد تكاثرت الزواحف المجنحة والتمساحيات والسلاحف والعظاءات في هذا العصر، وتطورت الثدييات أيضاً، على الرغم من أن حياتها تحت الأضواء لن تتجلى إلا بعد الانقراض الجماعي التالي.

لعل أحدث الانقراضات الجماعية هو أكثرها شهرة. وهو الذي حدث عند الحد بين العصر الطباشيري والعصر الباليوجيني. كان هذا الحدث يُعرَف في السابق باسم الانقراض الطباشيري-الباليوجيني (الذي يعني الطباشيري الثلاثي Cretaceous-Tertiary)، ولكنه تغير رسمياً الآن ليصبح الانقراض K-Pg (بسبب إعادة تسمية العصر الثلاثي بالعصر الباليوجيني)، وقد حصل قبل 66 مليون سنة. والشائع أنه الانقراض الذي قتل الديناصورات.

ولكن الديناصورات لم تكن هي الأنواعَ الوحيدة التي انقرضت. اختفى نحو ثلاثة أرباع ونصف الأنواع الحية في ذلك الوقت، بما فيها عديد من الزواحف والثدييات والنباتات والحياة المائية. الأحافير المجهرية المائية، الأكثر شيوعاً في سجل الأحافير، مهمة بنحو خاص لأن وفرتها قد تقدم سجلاً مفصلاً عما حدث. كل سنتيمتر من الترسبات المائية يمكن تحليلها لتعرض 10 آلاف سنة من النشاط، مما يعطي صورة دقيقة عما حدث في

المحيطات. يفحص برنامج حفر المحيط Ocean Drilling Program المنظم دوليا أسطوانات عينات الرسوبيات Cores بدقة تفوق 10 أضعاف هذه الدقة. ساعدت الأحافير المجهرية الدقيقة على تحديد اختفاء البلانكتون والمرجان والسمك العظمي والأمونيات ومعظم سلاحف البحر وعديد من التماسيح في ذلك الوقت أيضاً.

لاحقاً للانقراض K-Pg، أصبحت الثدييات هي اللاعب الأكبر على سطح الأرض. على الرغم من مساهمة عديد من العوامل، كانت إبادة الديناصورات البرية ذات علاقة بنحوٍ شبه مؤكد. ما كانت الثدييات الكبيرة (مثلنا نحن البشر) لتهيمن على الأرض لو لم تَفنَ الديناصورات البرية المسيطرة على المنافسة على الموارد الأساسية أولاً. وتشير إحدى التكهنات إلى أن سبب سيادة الديناصورات بما هو أفضل بكثير من الثدييات قبل اصطدام تشيكسولوب هو أن الديناصورات كانت تضع البيض بكميات كبيرة، في حين كانت للثدييات ذرية أقل، وكانت تلد بتواتر أقل كلما كان حجمها أكبر. لعل الديناصورات فازت بلعبة الأعداد في منافستها مع الثدييات الأكبر.

لأنه كان الأحدث- ولأنه مكّن الثدييات الكبيرة من أن تهيمن على الأرض- ينكب العلماء على دراسة الانقراض K-Pg بعناية أكثر من بين حوادث الانقراض الخمسة. إن البحث عن النظرية السليمة لتفسير الاختفاء العالمي للحياة على اليابسة وفي الماء هو قصة مشوقة سننتقل إليها في الفصل التالي. الإجابة شبه المؤكدة هي أن نيزكاً عملاقاً ضرب الكوكب قبل 66 مليون سنة. وعلى الرغم من أنه حدثٌ وقع في الماضي السحيق، إلا أن الفاصل في الزمن هو بطول سنة لشخص في الخمسين من العمر عندما يُقارَن بعمر الأرض الذي يبلغ 4 بلايين سنة. في رأيي إنه لَأمر مدهش أن هذا التدخل الفضائي قد أثَّر في الأرض بهذه العواقب الهائلة منذ فترة قصيرة (نسبياً).

انقراض سادس؟

ولكن قد تكون الكارثة وشيكة. سأكون متهاونة في التزاماتي الأخلاقية إذا أغلقتُ هذا الفصل من دون التعرض إلى تنبُّؤ أخير ومثير للقلق جداً. يعتقد عديد من العلماء اليوم أننا نعيش حالياً انقراضاً جماعياً سادساً- من صُنع الإنسان. للبرهنة على هذا الادعاء بنحو حاسم، نحتاج إلى تحديد عدد الأنواع الموجودة حالياً ومعدل اختفائها- الأمران صعبان، إن لم يكونا مستحيلَين. مع ذلك وحتى إن لم تكن حاسمة، فإن الأرقام التي بين أيدينا تشير حتماً إلى اتجاهات مقلقة. تشير الأدلة إلى معدل انقراض أعلى من المعتاد بقدر كبير، إذ تتوافق المعدلات الحالية لفناء الأنواع مع المعدلات المَقِيسة في أثناء الانقراضات السابقة. عند المعدل الأساسي Baseline rate التقديري، نتوقع نحو انقراض واحد في السنة. التقديرات غير مؤكدة، ولكن المعدل اليوم قد يكون مئات أضعاف المتوسط.

إذا كانت المعدلات المَقيسة على انقراضات الطيور والبرمائيات والثدييات تمثل ما هو آتٍ، فهي مقلقة جداً. تؤلف الثدييات جزءاً صغيراً من عدد الأنواع الإجمالي، ولكنها قِيست بنحو أفضل من غيرها. خلال الـ 500 سنة الماضية، انقرض 80 نوعاً من الثدييات مما هو أقل من 6 آلاف نوع.

إن معدل انقراض الثدييات هذا خلال الـ 500 سنة الماضية أعلى من الطبيعي بنحو 16 ضعفاً، وفي القرن العشرين ارتفع هذا المعدل بمعامل يعادل 32 ضعفاً. كما اندثرت البرمائيات في القرن العشرين بمعدل يقارب 100 ضعف أعلى من الماضي، و41% مهددة بالانقراض، بينما تجاوز انقراض الطيور في هذا الإطار الزمني نفسه المعدلَ الطبيعي بمعامل بقيمة 20 ضعفاً.

هذه الأرقام تتوافق مع حدث انقراض. كما لاحظ عالم الأحياء أنتوني بارنوسكي Anthony Barnosky من جامعة كاليفورنيا -بيركلي وغيره، كذلك التغيرات البيئية التي تحدث الآن، التي تشابه بنحو مقلق تلك التي حدثت في فترة الانقراض P-Tr. ارتفعت مستويات أكسيد الكربون في ذلك الوقت- وكذلك الحرارة- وأصبحت

المحيطات حمضية أكثر، وازدادت رقعة المناطق الميتة التي تخلو فيها البيئات المائية من الأكسجين. بنحو لا يصدَّق، يبدو أن معدل الحرارة والتغير في الأس الهيدروجيني pH (الذي يقيس الحموضة) مقاربان لما هما عليه اليوم.

من شبه المؤكد أن التأثير البشري هو الملوم بنحو رئيس على الخسارة الحديثة للتنوع. يؤثر الناس في الكوكب وفي أشكال الحياة فيه من عدة نواحٍ. عندما وصل الأوروبيون إلى شمال أمريكا، على سبيل المثال انقرض 80% من حيواناتها الكبيرة إلى حد كبير بسبب القتل الفوري. ولكن البشر يفسدون المواطن بطرق أخرى أيضاً. أحد الأسباب هو التلوث، والآخر تجريف الأراضي Land clearing– بما في ذلك إزالة الأشجار والصيد المفرط، والعامل الآخر هو تغير المناخ في صورة تغير في الحرارة وتغير في مستويات سطح البحر. الجفاف والحرائق والفيضانات والعواصف والمحيطات الأكثر سخونة وحمضية كلها مرتبطة ببقاء الأنواع. والتدمير الإنساني للمواطن يسهِّل غزو الأنواع على المستوى المحلي وتقليل التنوع في المجموعات على النطاق العالمي– ما يجعل أي مرض أو طفيلي أكثر خطورة. تنتقل الأنواع إلى مواطن جديدة عندما تستطيع، ولكن إذا دُمِّرت هذه المواطن، كذلك ستدمر من قد يقطنها. نظراً إلى كل هذه الآثار الضارة، فإن أزمة محدقة تحيق بمجاميع الكائنات الحية ليست أمرا غير معقول.

يلجأ بارنوسكي إلى الحجة المثيرة للاهتمام بأن النمو السكاني البشري الذي يعجل الأزمة الحالية يرتبط بنحو مثير باستهلاكنا للطاقة. بافتراض توزيع منصف للموارد وتقدير معقول لحجم ونطاق الثدييات الكبيرة، فإن الطاقة الآتية من الشمس يومياً تغذي عدداً معيناً من الحيوانات والأنواع. بدأ عدد الحيوانات الضخمة ينخفض من نحو 350 إلى نصف هذا الرقم في ما بين 50 ألف سنة و10 آلاف سنة خلَت، عندما ظهر الإنسان على الكوكب واستولى على جزء غير متكافئ من موارده. ونتيجة لذلك تراجع عدد الثدييات ببطء إلى قيمته السابقة، من ثم بدأ الازدياد بنحو متسارع قبل نحو 300 سنة– بنحو أساسي عندما سمحت الثورة الصناعية عند الإنسان باستخراج مدخرات الطاقة لدينا– الطاقة غير المستخدمة التي خُزِّنت على مر ملايين السنين في الوقود الأحفوري، وليس الاسم مصادفة. وبالغوص في مدخراتنا– على الرغم من تدهور عدد الأنواع– تفجرت الكتلة السكانية من البشر والمواشي مع ازدياد التمدن.

يجادل بعض المتفائلين– مع الاعتراف بالاتجاهات المقلقة– بأننا قد نولِّد أو نحيي الأنواع بتصميم أو بإعادة إنتاج الحمض النووي DNA ونتجنب الانقراض الجماعي (المحدد بالتغير الجزئي في عدد الأنواع أو عدد الأجناس)، وذلك بتعويض الأنواع المفقودة بأنواع جديدة. ولكن إحياء ما كان موجوداً من قبل سيكون أمراً صعباً، نظراً إلى صعوبة حفظ الحمض النووي وصعوبة خلق بيئة عاش فيها أي نوع من الأنواع. علاوة على ذلك، من غير المرجَّح أن يجاري المعدلُ الذي يمكننا أن نولِّد فيه نوعاً جديداً يمكنه البقاء السرعةَ التي نفقد بها الأنواع في العالم. على أي حال، الانقراض مجرد كلمة. يفشل التقييم المُعتمد على رقم واحد- في التقاط التغير الجذري الذي سيستدعيه مثل هذا السيناريو (مع الاعتراف بأنه غير مرجَّح).

من ناحية تقنية، هناك طريقة أخرى لتجنب الانقراض، وهي أن ينعكس الاتجاه قبل أن ينخفض العدد إلى النصف. على سبيل المثال، عندما تتناقص الأعداد بما يكفي، فإن أنواعاً ستبقى لم تكن لتقدر على المنافسة في بيئة أكثر تنوعاً حيوياً. هذا السيناريو "المتفائل" هو مجرد تنبؤ على أي حال، وإضافةً إلى ذلك، عامل الإنقاذ الوحيد هو خسارة كبيرة في الحياة تسبق بيئة مستقرة في النهاية.

قد تكون هذه التغيرات جيدة بالنسبة إلى بعض الأنواع المستقبلية. في المُحصِّلة، حتى الانقراض البرمي الترياسي قد ترك بعض أشكال الحياة كما هي. من وجهة نظر الديناصورات، على سبيل المثال، كان أمراً جيداً. لكن، هذا لا يتفادى خسارة الحياة التي عجلت به، أو فترة راحة مؤقتة من المعاناة والفوضى تعافت في أثنائها الحياة. على الرغم من أن عواقب التغير الذي نحفزه الآن قد تكون مفيدة من بعض النواحي العالمية، إلا أنها لن تكون كذلك بالضرورة بالنسبة إلى الأنواع التي تطورت على الأرض لتتكيف مع الحياة كما هي عليه الآن.

حتى إن ظهرت أنواع جديدة أو تحسنت الظروف في النهاية، لن يكون عالما متغيرا بشكل جذري أمراً جيداً بالنسبة إلينا كنوع. حقاً لا يبدو ذلك حصافة منا نحن البشر أن نكون مسؤولين عن الخسارة الكبيرة في التنوع الحيوي– ونتيجتها الخسارة في الطعام والدواء والهواء والماء النقيين– ففي الغالب سنؤذي أنفسنا بفعل ذلك. لقد تطورت الحياة بآليات توازن حساسة. وليس من الواضح كم من هذه الآليات يمكن أن يتغير من دون تغيير جذري في النظام الإيكولوجي والحياة على الكوكب. قد تعتقد أن لدينا اهتماماً أنانياً بمصيرنا– خاصة عندما يمكن منع كثير من هذه الخسارة. في النهاية، وعلى عكس المخلوقات قبل 66 مليون سنة التي كان مصيرها محدداً بنيزكٍ جانح، يجب أن يتمتع البشر اليوم بالقدرة على رؤية ما هو آتٍ.

الكل يحب الديناصورات. فسواء كانت هيكلاً عظمياً أو أحفورةً أو حتى دُميةً من البلاستيك المُشكَّل، فإنها تسحر لب الكبير والصغير. يحب الأطفال هذه المخلوقات من الماضي- فيصنعون النماذج ويحفظون الأسماء التي بالكاد يستطيع معظم البالغين لفظها. وأي متحف يعرض ديناصوراً سيزدحم بالأطفال أو بمن هم أكبر سناً. يدرك أمناء متاحف التاريخ الطبيعي السحرَ الجاذب لهذه الزواحف الغريبة العتيقة. يُحصي متحف التاريخ الطبيعي الأمريكي American Museum of Natural History في نيويورك من بين مقتنياته الرئيسة هياكلَ عظمية ضخمة لتيرانوصورس ريكس Tyrannosaurus rex (ترجمتها "ملك السحالي") وأباتوصورس Apatosaurus، إضافة إلى نماذج من أنواع من أقربائها تحييك عند المدخل.

الدليل الآخر على شعبيتها هو دور البطولة الذي تؤديه الديناصورات في الثقافة الشعبية- من دينو Dino في المسلسل الكرتوني ذا فلينتستون The Flintstones (لا، لم تتعايش الديناصورات البرية مع البشر) إلى الديناصورات المجددة في أفلام "جوراسيك بارك (الحديقة الجوراسية)" Jurassic Park- (لا، لن يحدث هذا في المستقبل). حتى صناع فيلم "كينغ كونغ" لم يكونوا راضين عن قرد عملاق قادر على تسلُّق مبنى إمباير ستيت. بل كان عليهم أن يضموا مشهداً إضافياً مع الديناصورات (الرأي المطروح يمثل رأي الكاتب فقط).

لماذا؟ لأن الديناصورات كانت مذهلة. إذ تُشبه الحيوانات الحالية بما يكفي لتبدو مألوفة، ولكنها كانت مختلفة بما يكفي لتبدو غريبة وعجيبة بحيث تثير خيالنا. كانت لها قرون وعُرف ودرع عظمية وعمود فقري. بعضها كان عملاقاً وبطيئاً بينما كان غيرها صغيراً وسريعاً. بعضها مشى على اليابسة- منها على رجلين ومنها على أربع- وبعضها طار في الجو.

مع ذلك بالنسبة إلى الكثير من الناس، أول ما يخطر في البال عندما يفكرون في الديناصورات هو أنها لم تعد موجودة على سطح الأرض. على الرغم من أن الديناصورات تطورت إلى طيور باقية اليوم، فإن الديناصورات التي هيمنت على الأرض ملايين السنين انقرضت منذ نحو 66 مليون سنة. بل إن بعض الناس ينظرون إلى هلاك الديناصورات بشيء من الفوقية- كيف يمكن لمخلوقات قوية ومرنة كهذه أن تكون غبية بما يكفي لتَهلَك؟ غيرَ أن الديناصورات ظلت حقيقةً لاعباً أساسياً على الكوكب مدةً أطول مما قد يصمدها البشر أو القِرَدة Apes. عندما انقرضت، لم يكن ذلك بسبب خطأ منها.

لطالما كان السؤال عما جعل ديناصورات اليابسة تغادر الكوكب لغزاً عميقاً حيَّر العلماء والجمهور على حد سواء. لمَ قد تختفي فجأة هذه المجموعة المتنوعة التي تضج حيوية والتي يبدو أنها أتقنت بيئتها مع نهاية العصر الطباشيري؟ قد يبدو هذا الموضوع بعيدا عن الفيزياء- خاصة المرتبطة بالمادة المعتمة. ولكن هذا الفصل يقدم عديداً من الأدلة التي تُبين أن اصطداماً نيزكياً كان الجاني- ما يربط هذا الانقراض بجرم من الفضاء الخارجي في المجموعة الشمسية. وإذا تبين أن عملي الفكري أنا وزملائي صحيح فإن قرصاً Disk من المادة المعتمة في مستوى درب التبانة كان المسؤول عن دفع مسار النيزك المميت. مهما كان دور المادة المعتمة، فإن اصطدام جرم قادم من الفضاء الخارجي- أباد على الأقل نصف الأنواع على الكوكب- قد حصل بالفعل، مما يربط هذا الانقراض ببيئة مجموعتنا الشمسية. قصة كيف وصل علماء الجيولوجيا والفيزياء والكيمياء والأحافير إلى هذا الاستنتاج هي من أفضل قصص العلم الحديث.

عصر الديناصورات

فضلاً عن تفاوت أحجامها وروعتها، كانت الديناصوراتُ- بوصفها مجموعةً- مذهلةً بطول عمرها Longevity وسيطرتها على الكوكب أكثر من 100 مليون سنة. مع ذلك على الرغم من نشاطها الواضح وازدهار الحياة النباتية والحيوانية التي رافقتها، انتهى قسم كبير من الحياة فجأة قبل 66 مليون سنة. الأسئلة التي سادت حتى زمن متأخر من القرن العشرين هي لماذا وكيف حدث ذلك.

قبل الإجابة عن هذه الأسئلة، فلنتأمل عصر الديناصورات، وكيف كانت الأرض مختلفة آنذاك. عاشت الديناصورات في الحقبة الوسطى Mesozoic Era، التي امتدت من 252 إلى 66 مليون سنة. (انظر: الشكل 29). تأتي كلمة Mesozoic من المصطلح الإغريقي "الحياة المتوسطة"، وبالفعل تقع هذه الحقبة في الوسط بين ثلاث حقب جيولوجية من دهر البشائر. الحقبة الوسطى تقع بين الحقبة الأولية Paleozoic، التي يعني اسمها "الحياة القديمة"، والحقبة المعاصرة Cenozoic التي يشير اسمها إلى "الحياة الجديدة". يعكس هذا التقسيم أكثر حوادث الانقراض الجماعي التي نعرفها كارثية – حدث الانقراض البرمي الترياسي، الذي يحدد الحد الأول، والانقراض الطباشيري الباليوجيني Cretaceous-Paleogene – المعروف سابقاً بالانقراض الطباشيري-الباليوجيني K-T extinction – الذي يحدد الحد الثاني، والذي اختفت فيه الديناصورات وكثير من الأنواع (غير الطائرة).

يأتي الحرف K في K-T من الكلمة الألمانية Kreide، التي تعني الطبشور. وبالمثل، تأتي الكلمة "Cretaceous" التي يشير إليها الحرف K من الكلمة اللاتينية Creta، وهي تعني حرفياً Cretan earth "الأرض الطبشورية"– وتعني أيضاً الطبشور. أما حرف T فيأتي من Tertiary– آثار باقية من مخطط تسمية أصبح بالياً الآن كان يقسِّم تاريخ الأرض إلى أربع أقسام، وTertiary هو الثالث فيها. مع ذلك، ومثلَ كثيرين، أعود أحياناً إلى استخدام المصطلح K-T الأكثر شيوعاً للإشارة إلى الانقراض، على الرغم من أنني سأستخدم عادةً المصطلح الأصح K-Pg من الآن فصاعداً.

تنقسم الحقب إلى عصور، وهي تنقسم بدورها إلى فترات ومراحل. تنقسم الحقبة الوسطى إلى ثلاثة عصور: العصر الترياسي (أو الثلاثي)– الذي دام من 252 إلى 201 مليون سنة مضت، والعصر الجوراسي– من نحو 201 إلى 145 مليون سنة مضت، والعصر الطباشيري– من 145 إلى 66 مليون سنة خلت. قد يكون مصطلح "Mesozoic Park" (حديقة الحقبة الوسطى) اسماً أكثر دقة لفيلم مايكل كرايتون وستيفن سبيلبرغ، الذي يَعرض ديناصورَين من العصر الجوراسي وعدة ديناصورات لم تظهر حتى العصر الطباشيري. سأعترف مع ذلك بأن اسم "جوراسيك بارك" أفضل وقعا، لذلك لن أشكِّك في الحكمة من اختيار الاسم.

حدثت تغيُّرات كثيرة على الأرض خلال الحقبة الوسطى. فكان هناك احتباس وتبريد إضافةً إلى نشاط تكتوني بارز غيَّر الغلاف الجوي وشكَّل كتلَ اليابسة. انقسمت القارة العملاقة بانغيا Pangaea في الحقبة الوسطى إلى القارات التي نراها اليوم، أدت إلى تحرُّك اليابسة حركةً شديدة على مر الزمن.

على الرغم من أن الحركة التكتونية في العصر الطباشيري المتأخر جعلت الكوكب أقرب إلى حالته الحالية، لم تكُن القارات والمحيطات قد وصلت في موقعها الحالي بعد. كان على الهند أن تندمج مع آسيا، وكان المحيط الأطلسي أضيق بكثير. ومع تحرك الصفائح التكتونية منذ ذلك الحين تغيَّر حجم المحيطات بمعدل عدة سنتيمترات سنوياً.

يخبرنا هذا التأثير وحده أنه قبل 66 مليون سنة، كانت معظم الشواطئ تبعُد عن مواقعها الحالية بنحو عدة آلاف من الكيلومترات– لذا، على سبيل المثال، كانت الأمريكتان وأوروبا أقربَ بكثير. إضافةً إلى ذلك، ربما كانت مستويات سطح البحر أعلى بعدة مئات من الأمتار مما هي عليه اليوم. تبين أن هذه العوامل هي عوامل محورية في فك رموز بعض الأدلة التي تكشفت عند الحد K-Pg. ومع أننا نعلم اليوم أنه في زمن تشكُّلها، كانت الرواسب الإيطالية المحتوية على الصلصال الذي قرر الجيولوجي وولتر آلفاريز Walter Alvarez من بيركلي دراسته، كانت جزءاً من الجُرف القاري Continental shelf الذي كان يقع على عمق مئات الأمتار تحت الماء، مع ذلك فإن العلماء لم يعلموا ذلك فيما سبق.

تطورت الحياة على الأرض استجابةً لبيئتها المتغيرة. إذ سمحت قطع اليابسة المتحركة العديدة التي فصَل بينها الماءُ بظهور أنواع جديدة. فظهرت خلال العصر الترياسي مفصليات الأرجل والسلاحف والتمساحيات والسحالي والأسماك العظمية وقنافذ البحر والزواحف البحرية وأول زواحف مشابهة للثدييات. يتميز العصر الترياسي المتأخر أيضاً بظهور عديد من الأنواع المميزة من الديناصورات، بما فيها الديناصورات البرية. وتزايدت أعدادها حتى أصبحت الفقاريات السائدة على اليابسة خلال العصر الجوراسي.

كذلك ظهرت الطيور في هذا الزمن، إذ تطورت من فرع من ديناصورات الثيروبدوا. لا يعرض فيلم جوراسيك بارك العلم بنحو صحيح بالضرورة، ولكنه علَّم الكثيرين أن الطيور تطورت من الديناصورات. استمرت الزواحف الطائرة والزواحف المائية والبرمائيات والسحالي والتمساحيات والديناصورات في البقاء حتى العصر الطباشيري، الذي ظهرت خلاله الثعابين والطيور المبكرة أول مرة، وكذلك الزواحف الطائرة وأشجار الجنكة Gingkoes، إضافةً إلى نباتات معاصرة مثل السيكادات Ccads والمخروطيات Conifers والسيكوات Redwoods والسرويات Cypresses والطقسوسيات Yews، التي لا نزال نرى أشكالها حتى اليوم. كما ظهرت الثدييات أيضاً، ولكنها كانت صغيرة- عموما بين حجم القط والفأر. ولم يتغير هذا إلا بعد أن انقرضت الديناصورات وخلت الساحة وأُتيحت الموارد لتتطور إلى حيوانات أكبر حجماً.

البحث عن أجوبة

في أثناء عملي على هذا الكتاب، قرأت كتابَين مذهلين أحدهما للجيولوجي وولتر ألفاريز بعنوان تي ريكس وفوهة الهلاك T. rex and the Crater of Doom والآخر للكاتب العلمي تشارلز فرانكل Charles Frankel بعنوان نهاية الديناصورات The End of the Dinosaurs. وولتر ألفاريز هو الداعي الأساسي لفرضية النيزك وكان كتابه ممتعاً جداً. أعترف بأن أحد الأسباب التي جعلت كتاب فرانكل مميزاً في نظري هو أنني عندما اشتريتُه عن طريق موقع أمازون كان نافداً من المطبعة، والنسخة التي وصلتني كانت في الأصل من مكتبة روكبورت العامة وعليها ختم "إتلاف". ولو لم يُرسَل الكتاب بالبريد إلى منزلي- موئل أكثر ملاءَمة- لربما انقرض هو أيضاً.

كلا الكتابين يحكي القصة المذهلة عن كيفية برهنة علماء الجيولوجيا والكيمياء والفيزياء على أن نيزكاً عملاقاً (تذكَّر أنني أستخدم كلمة "نيزك Meteoroid" للدلالة على الأجرام الكبيرة أيضاً) كان هو السببَ شبه المرجح في الانقراض الذي أباد الديناصورات- إضافة إلى عدد كبير من الأنواع الأخرى التي كانت حية في ذلك الزمن. تكثر الأدلة على أن هذا النيزك قد عجل في التغير المفاجئ في سجل الأحافير خلال الانقراض K- Pg. وعثر العلماءُ على كل السمات التي تميز الفوهات الصدمية، بما فيها الكريات Spherules والتكتيت Tektites والكوارتز المصدوم Shocked quartz في محيط طبقة إيريديوم حِدّيّة Boundary layer تفصل بين غزارة الحياة تحتها وندرة سجل الأحافير فوقها.

يروي الكتابان أيضاً قصة التحريات الملهمة عن كيفية عثور العلماء على الفوهة التي تتطابق مع الاصطدام النيزكي، على الرغم من أنني أدركتُ عند استشارتي للمختصين أن بعض مواضع المادة المطبوعة كانت مضللة. وسأفعل ما في وسعي لأصححها هنا. إنها قصة رائعة.

مع أن فكرة نيزك يسبب انقراضاً قد ترسخت في أواخر القرن العشرين فقط، إلا أن البشر تفكروا في عواقبها المخيفة المحتملة منذ قرون. وعندما لاحظ الناسُ المذنباتِ أولَ مرة، اعتبروها مهددة للحياة- ولكن لأسباب خرافية لا أساس لها من الصحة. في العام 1694، اقترح إدموند هالي Edmond Halley بجرأة أن مذنباً كان سبب الطوفان المذكور في الإنجيل. بعد نحو 50 سنة، في العام 1742، رسخ العالم والفيلسوف الفرنسي بيير لوي دي موبورتوي Pierre-Louis de Maupertuis الأساس العلمي للتهديدات المحتملة من المذنبات عندما

أدرك أن اضطرابات الغلاف الجوي والمحيطات بفعل المذنبات قد تُبيد كثيراً من أشكال الحياة. كما اقترح فرنسي آخر، هو العالم العظيم بيير سيمون لابلاس Pierre-Simon Laplace الذي لا يزال عمله حول تشكُّل المجموعة الشمسية راسخا حتى اليوم، أن النيازك يمكنها أن تُعجِّل في الانقراض.

ولكن أفكارهما أُهملَت إلى حد كبير، لعدم القدرة على اختبارها ومن ثم بدت جامحةً بعضَ الشيء. كما أُهمِلت أفكار عالم الأحافير إم. دبليو. دي لوبينفيلز M. W. de Laubenfels الذي أدرك في العام 1956 التداعيات المحتملة للنيزك الذي ضرب سيبيريا في العام 1908 وأدى إلى إبادة مساحات واسعة من الغابات– مُحدِّداً الأضرار كالحرائق والسخونة التي قد يسببها مجرد جزء من المذنب. في تحليل نافذ البصيرة إلى درجة مذهلة، أدرك أيضاً أن هذه التأثيرات البيئية ستؤثر في الأنواع المتباينة بنحو مختلف، بحيث قد تبقى الثدييات التي تعيش في جحور على قيد الحياة، – وهو ما حصل بالفعل بعد حدث الانقراض K-Pg.

حتى العام 1973، أهمل معظم العلماء أفكارَ الجيوكيميائي هارولد أوري Harold Urey عندما اقترح، مستنداً إلى التكتيت الزجاجي لصخرة مذابة، أن اصطداماً نيزكياً كان المسؤول عن الانقراض K-Pg. ولكن أوري كان مبالغاً في حماسه بعضَ الشيء، باقتراحه أن جميع حوادث الانقراض، وليس فقط الانقراض K-Pg، كانت نتيجة اصطدام مذنبات. ومع ذلك حدّد توجه الدراسات المستقبلية، وساعد على تحويل النظريات المقترحة إلى علم حقيقي بالإشارة إلى أن التحريات التفصيلية ستكون قادرة على تحديد الصخور التي يمكن تفسير تركيبتها وشكلها فقط بحرارة و/أو ضغط اصطدام نيزكي.

لكن، أُهملت جميع الأفكار الذكية والمتبصرة من مثل هذه إلى أن تقدم ألفاريز بنظريته المقترحة. كانت فكرة اصطدام كوني يسبب انقراضاً فكرة متطرفة حتى في ثمانينات القرن العشرين، وربما بدت عبثية عند سماعها أول مرة. هذا يذكرني ببعض النظريات التي أسمعها ممن هم في الثانية عشرة من العمر الذين يحضرون محاضراتي العامة، إذ يحاولون إثارة إعجابي بحشر جميع المصطلحات العلمية التي سمعوها في حياتهم ضِمنَ حديثهم. قد يؤدي هذا إلى سيناريوهات مبتدعة وربما مضحكة، مثلما حدث حين سألني أحد اليافعين عن نظرية ادعى أنه دائماً يفكر فيها، نظرية تحلّ فيها الثقوبُ السوداء ملفوفة جميعَ مشكلات الكون التي لم تُحلَّ بعد. من حسن الحظ، أنه ضحك عندما اقترحت أنه لم يفكر بهذا الأمر دائماً فعلاً.

ولكن كما هي الحال مع النظريات المتطرفة التي تترسخ في النهاية، يمكن أن تفسر نظرية النيزك المقترحة ملاحظاتٍ رصدية تحدَّت التفسيرات الأكثر تقليدية. ما من عملية أرضية يمكنها أن تبرر جميع الظواهر التفصيلية التي عُثر عليها والتي دعمت بالنهاية هذه الفرضية. حازت هذه النظرية المقترحة القبولَ، لأنها قدمت تنبؤات برهن البحثُ صحةَ عديدٍ منها.



[الشكل 30] مع مدير الحديقة الجيولوجية، آسير هيلاريو، في الحد الطباشيري الباليوجيني K-Pg على شاطئ إتزورن في زومايا، إسبانيا. (إهداء: جون أوريستيلا).

كيف تجلّى الإلهام

بدأت قصة التحري العلمي لوولتر ألفاريز في إيطاليا، حيث كَشفت تلالُ أومبريا Umbria بالقرب من جوبيو Gubbio - على بعد بضع مئاتٍ من الكيلومترات شمال روما- عن طبقات رسوبية بحرية Marine sediment تعود بتاريخها إلى ما بين الفترة المتأخرة من العصر الطباشيري والفترة المبكرة من العصر الثلاثي (المعروف الآن بالباليوجيني). وصخور سكاليا روزا Scaglia Rossa، كما تُعرف بسبب لونها الوردي، هي صخور رسوبية تتكون من حجر كلسي غير اعتيادي من أعماق البحر– كالسيت Calcite أو كربونات الكالسيوم Calcium carbonate، وهو المادة التي يتألف منها معظم المحار وما تحتويه أحياناً المكملات الغذائية لصحة العظام– والتي تشكلت في قاع البحر ثم دُفعت لاحقاً إلى الأعلى لتصبح مكشوفة الآن. عَنى ذلك أن الدليل على الانقراض– وهو طبقة رفيعة من الصلصال الذي يفصل طبقة الصخور السُّفلى والأكثر بياضاً عن الطبقة الحمراء فوقها– سيكون مرئياً للمار اليقظ. كانت الأحافير في الطبقة السفلى والأكثر بياضاً في الصخرة في الغالب بقايا فورامنيفرا وأوليات وحيدة الخلية عاشت في أعماق المحيطات، وهي في غاية الأهمية لنا لاستنتاج عمر الصخور الرسوبية. ولكن فقط أصغر الفورامنيفرا كانت موجودة في الطبقة الأعلى والأقتم. الفورامنيفرا انقرضت تقريباً مع الديناصورات، مما جعل حدود الانقراض واضحة تماماً.

تحتوي حديقة الفليش الجيولوجية التي زرتُها في أثناء زيارتي الجامعية الأخيرة إلى بيلباو على قطعة من الحدّ K-Pg– والتي تبدو كخط رفيع غامق بالقرب من قاعدة جُرف حجر كلسي. مثل كل الأماكن في الكوكب التي توجد فيها هذه الطبقة من الصلصال، يعود تاريخ الحدود إلى نحو زمن الانقراض. اعتبرتُ نفسي محظوظة جداً عندما رتّب لي زميلي الفيزيائي وقريبه الجيولوجي زيارةً إلى الموقع الساحر على شاطئ إتزورون، حيث استطعت هناك أن أرى الحدود من كثب في أثناء زمن الجَزْر. كانت فرصة لِمْس قطعة من التاريخ تعود إلى 66 مليون سنة شيئاً شبهَ سريالي. (انظر: الشكل 30). على الرغم من أن الجرف يضرب عميقا في الماضي السحيق، فإن كنز المعلومات فيه لا يزال حاضراً اليوم بوصفه جزءاً من عالمنا.

عند الحدود الطباشيرية الباليوجينية K- PG

في سبعينات القرن العشرين، درس وولتر ألفاريز طبقة حدود مماثلةً في طبقات سكاليا روزا، حيث ركز اهتمامه على الصلصال الذي فصل بين الحجر الجيري Limestone الأفتح لوناً في الأسفل والذي كان مملوءاً بالأحافير، والحجر الجيري الأغمق الذي خلا منها. هذا الصلصال الذي جعله ألفاريز هدفاً لدراساته كان جوهرياً في الكشف عن سبب الكارثة التي حدثت قبل 66 مليون سنة. اعتمدت سماكة الصلصال على قدر الزمن الذي مر بين ترسُّب كل من الطبقتين الأفتح والأغمق؛ مما ساعده على تحديد ما إذا كان الانقراض سريعاً أو بطيئاً.

عندما بدأ ألفاريز التفكيرَ في طبقة الحدّ K-Pg في سبعينات القرن العشرين، كانت وجهة نظر التدرج والوتيرة الواحدة سائدة على الجيولوجيا والتي دعمتها أخيراً نظرية الصفائح التكتونية التي تطورت على مدى العَقدين الأخيرين. يمكن لقارات بكاملها أن تنفصل تدريجياً، يمكن لسلاسل الجبال أن تتكون على مر الزمن، والوديان العميقة مثل غراند كانيون Grand Canyon يمكن أن تنشأ بتأثير تدريجي– بما فيها نهر مثل نهر كولورادو الذي يشق الأرض، والحت الجليدي والمائي، وحركة صفائح اليابسة، أو ثوران الصهارة– يمكن لأي منها أن يغير المنطقة بنحو جذري على مر الزمن. لم تكن هناك حاجة إلى كوارث لتعلل هذه التغيرات الجذرية الظاهرة.

بدا تشكُّل الحجر الجيري غامضاً، إذ أشار الاختلاف بين المستوى الأعلى والأسفل من الحجر الجيري إلى تغيُّر فجائي، ما يتعارض مع منظور التدرج. لو أنه كان موجودا حينها، لفسر تشارلز لايل رقة الطبقة K-Pg بأنها مضللة ببساطة، واستنتج أنه على الرغم من الظاهر، استغرق الأمر كثيراً من السنين لتتشكل. ربما ظن داروين أن الشكل كان ببساطة وهماً ناتجا من سجلٍ أحفوري ناقص.

الطريقة الوحيدة لمعرفة ما إذا كان التغير مفاجئاً- وليس فقط مجرد ترسبات صلصالية انجرفت خلال عدة أيام- هي قياس المدة الضرورية لترسب الصلصال الذي يفصل بين اللونين المختلفين من طبقات الحجر الجيري. كانت هذه المهمة التي أخذها ألفاريز- الذي له اهتمام قديم بتأريخ الأحداث الجيولوجية- على عاتقه. أمَل ألفاريز أن يدرس انعكاسات مغناطيسية الأرض ليعلم مزيداً عن زمن ترسب الحدّ K-Pg، الذي علم أنه دليل مهم على الحدث المحفِّز. (ذكر آندي نول Andy Knoll، أستاذ في التاريخ الطبيعي وعلوم الكواكب والأرض في هارفارد، أن ألفاريز وزوجته كانا مهتمَّين بفنون القرون الوسطى والفن المعماري. أشك أنه كان لاهتمامهما دورٌ في هذا البحث).

ولكن تبين أن الطريقة الأفضل لقياس المدة التي يستغرقها الصلصال ليترسب هي قياس محتواه من الإيريديوم. الإيريديوم معدن من العناصر النادرة Rare elements، وهو ثاني أكثف عنصر بعد الأوزميوم. وخاصية مقاومة الحت تجعله صالحا كقطب كهربائي في شمعة الاحتراق Spark plug وريشة قلم الحبر، من بين عديد من الأشياء الأخرى. كما تبين أيضاً أنه مفيد في العلوم؛ فالارتفاع في كمية الإيريديوم التي اكتشفها وولتر ومساعدوه هي المفتاح لإثبات منشأ حدث الانقراض.

مع أنني كنت أعلم منذ فترة عن الارتفاع الكبير في الإيريديوم، ويا لدهشتي عندما علمتُ أخيراً أن المقصد الأساسي لوولتر ووالده الفيزيائي -لويس ألفاريز- هي قياس مستوى الإيريديوم في الصلصال بناء على تعليل عكس ما توصلوا سريعاً إلى صحته. عَلِم لويس ألفاريز أن النيازك فيها مستويات إيريديوم أعلى بكثير مما هو على الأرض. وعلى الرغم من مستويات الإيريديوم على الأرض يجب أن تكون نفس تركيزها على النيازك، فإن معظم الإيريديوم الأصلي على الأرض تحلل منذ زمن بعيد إلى حديد مصهور، وغاص معه إلى لب الأرض. لذا فإن أي إيريديوم على السطح يجب أن يكون من منشأ خارجي.

افترض لويس ألفاريز أن غبار النيزك يجب أن يترسّب بمعدل ثابت نوعاً ما. (في الواقع اقترح في البداية استخدام بيريليوم - 10، ولكن تبيَّن أن فترة نصف حياته Half life قصيرة جداً لتكون أداة عملية في حل هذه المعضلة). يجب أن تكون مستويات الإيريديوم على السطح منخفضة جداً لولا الترسب من هذا "المطر" Rain الخارجي الثابت. ولاحت لألفاريز الأب والابن الفكرة الذكية بأن دراسة مستويات الإيريديوم على الأرض ستمكنهما من استخدام الساعة الكونية مما سيساعد على تحديد الزمن الذي يستغرقه ترسُّب صلصال الحدّ K-Pg. ما توقعوه هو توزع متساوي على مر الزمن يشير إلى ترسُّب مستقر شبه ثابت يمكن استخدامه لاستنتاج قدر الزمن المستغرق لتشكيل كل طبقة.

بَيْدَ أن ما وجده وولتر ومساعدوه عندما تفحصوا الصخرة كان مختلفا تماماً. والمفاجأة التي أقنعت ألفاريز بأن شيئاً غريباً يحدث هي أن مستويات الإيريديوم في الصلصال أعلى بكثير مما توقعوا. في العام 1980، وجد فريق من العلماء في جامعة كاليفورنيا، بيركلي University of California, Berkeley- الفريق المؤلف من الأب والابن لويس وولتر ألفاريز، بالاشتراك مع عالمَي الكيمياء النووية فرانك أزارو Frank Asaro وهيلين ميشيل Helen Michel، اللذين استطاعا قياس تركيز الإيريديوم في مستويات بالغة الانخفاض- ارتفاعاً حاسما في الإيريديوم- أعلى في ساكاليا روزا بـ 30 ضعف ما هو في الحجر الجيري المحيط. وصُحِّح هذا الرقم لاحقاً إلى 90.

لم يُعثَر على هذا النوع من التشكُّل في إيطاليا فقط (من المؤسف أن كثيرين أخذوا عينات من ساكاليا روزا منذ زمن وولتر ألفاريز، حتى أصبح من الصعب الوصول الآن إلى صلصال الحدّ K-Pg) بل في جميع أنحاء العالم أيضاً، وقد ارتفعت مستويات الإيريديوم فجأة في هذه المناطق ارتفاعاً ملحوظاً أيضاً. في طبقة صلصالية مماثلة في ستيفنز كلينت Stevns Klint – جُرف ساحلي في الدانمارك فيه دليل محفوظ حفظا جيدا للحدّ K-Pg كان الارتفاع بمعامل يعادل 160 ضعفاً. وأكدت مختبرات أخرى المستويات المرتفعة من الإيريديوم في طبقات حدود مماثلة في أماكن أخرى.

إذا كانت الفرضية الأصلية (والحافز للقياس) صحيحة، وأن غباراً نيزكياً هطل بمعدل ثابت، فسيستغرق صلصال الحدّ K-Pg أكثر من ثلاثة ملايين سنة ليتشكل. ولكن هذا زمن طويل جداً لتتشكل فيه طبقة الصلصال الرقيقة التي تمثل الحدّ K-Pg. عوضاً عن ذلك، إذا كان مستوى الإيريديوم مرتفعاً ارتفاعاً مماثلاً في جميع أنحاء الكوكب، فإن 500 ألف طن من الإيريديوم- الذي هو معدن نادر على الأرض - قد هبطت فجأة على كوكبنا في زمن الانقراض K-Pg. قد يكون المصدر الكوني هو التفسير الوحيد لهذا الترسُّب الهائل. الأرض جوهريا فقيرة إلى الإيريديوم على السطح إلى درجة أنه من دون ظاهرة من الفضاء الخارجي سيكون من المستحيل تفسير مستوى الإيريديوم العالي.

حدد فريق بيركلي أيضاً الوفرة النسبية لعناصر نادرة أخرى لكي يضيقوا الاحتمالات. فعلى سبيل المثال، قد يكون المصدر الخارجي هو سوبرنوفا. في هذه الحالة سيكون هناك بلوتونيوم -244 في الصلصال أيضاً. وقد أوضح التحليل الأولي هذا بالفعل، كان هذا العنصر موجوداً أيضاً. ولكن كبحث ملتزم بالمعايير العلمية، أعاد أزارو وميشيل تحليلهما في اليوم التالي، واكتشفا عدم وجود بلوتونيوم. كانت النتائج الأولية لا تعدو أن تكون تلوُّثاً في العينة ببساطة.

بعد إرهاق تفكيرهم في البحث عن البدائل، بقي أمام علماء بيركلي تفسير منطقي وحيد بنحو أساسي لتبرير المستويات العالية من الإيريديوم- اصطدام هائل لجِرم من الفضاء الخارجي حدث قبل نحو 65 مليون سنة. في العام 1980، اقترح الفريق بقيادة وولتر ولويس ألفاريز أن نيزكاً عملاقاً اصطدم بالأرض وأمطر معادن نادرة، بما فيها الإيريديوم. كان هذا الاصطدام النيزكي هو الحدثَ الوحيد الذي يمكن أن يبرر الكمية الإجمالية للإيريديوم ومعدلات العناصر الأخرى التي تطابقت مع تلك التي تُعَد من خواص المجموعة الشمسية.

بالاستناد إلى الإيريديوم المَقِيس ومتوسط محتوى الحجر النيزكي من الإيريديوم، استطاع العلماء أن يخمنوا حجم الجرم الذي اصطدم. واستنتجوا أنه كان بقطر 10-15 كم.

دليل صادم

نظراً إلى الآليات المميتة التي قد يطلقها اصطدام نيزك ضخم، إلى جانب ندرة التفسيرات المناسبة للدليل الجيولوجي المرتبط بحدث الانقراض K-Pg، بدا تفسير من خارج الأرض بديلاً منطقياً ومعقولاً أكثر من الاقتراحات التقليدية مثل العمليات المُحفَّزة جيولوجياً أو مناخياً. مع ذلك على الرغم من مدي إقناع الفرضية، يتعين على أي عالِم- مهما كان جريئاً- أن يكون حريصاً عندما يقدم فكرة جديدة. أحياناً تكون النظريات المتطرفة صحيحة، ولكنها في الغالب الأعم ليست كذلك، ربما أغفلنا تفسيراً تقليدياً أو لم يُقيَّم تقييماً صحيحاً. فقط عندما تفشل أفكار علمية راسخة حيث تنجح الأفكار الأكثر جرأة، تترسخ الأفكار الجديدة بقوة.

لهذا السبب فإن الجدل أمر جيد في العلم عند النظر إلى نظرية غريبة (حرفياً). على الرغم من أن أولئك الذين يتجنبون ببساطةٍ فحص الأدلة لن ييسروا التطور العلمي، فإن مناصري وجهة النظر السائدة من الأوفياء الذين يثيرون الاعتراضات المنطقية سيرفعون معايير تقديم فكرة جديدة إلى مجمع العلم. إن إجبار أصحاب الفرضيات الجديدة- خصوصاً الراديكالي- على مواجهة نظرائهم سيحول دون ترسخ الأفكار الجامحة أو الخاطئة. وستحفز المقاومةُ المقترحين ليرفعوا من مستوى حجتهم لإظهار السبب وراء عدم صحة الاعتراضات ضد أفكارهم، ولحشد أكبر قدر ممكن من الدعم لأفكارهم بل إن وولتر ألفاريز كتب أنه سعيدٌ لأن فكرة النيزك استغرقت بعض الوقت لتجد دعماً قاطعاً؛ لأنها أتاحت الوقت للعثور على جميع الأدلة الثانوية التي عززت القضية.

قوبلت فرضيةُ النيزك بالمقاومة فعلاً من قِبل أولئك الذين اعتقدوها نظرية مبالغاً فيها– فضل عديد منهم وجهة نظر التدرج. بنحوٍ مربك، قدمت الصفائحُ التكتونية الدعم لوجهة النظر هذه تقريباً في الوقت نفسه الذي كانت فيه مهمات القمر -وصورها المقرَّبة للعديد من الفوهات- تقدم دعما قويا للتأثيرات الكارثية المحتملة للاصطدامات. لعل هذين التطورين المختلفين– عند أخذهما بعين الاعتبار معا- هما ما جعل الجيولوجيين يميلون نحو وجهة نظر التدرج بينما مال الفيزيائيون إلى النظرية الكارثية.

بالطبع من الممكن أن فوهات القمر قد نشأت في المراحل الأولى من تشكله– والواقع أن معظمها كان كذلك– لذا فإن وجودها في حد ذاته لم يكن دليلا على أهمية الاصطدامات النيزكية في مرحلة لاحقة من التطور. مع ذلك، فإن شيوعها لابد أن قاد- وهو ليس مستغرَباً بالدرجة نفسها- إلى افتراض أن العمليات الكارثية، وليس فقط التدريجية، أدت دوراً في مجموعتنا الشمسية وتطور الحياة فيها. كانت الفوهات دليلاً واضحاً وملموساً على الاصطدامات القمرية. والأرض أكبر من القمر وقريبة منه جداً بحيث يصبح من الواضح أن النيازك قد تضرب هنا أيضاً.

ولكن في زمن اقتراح ألفاريز، فضل كثير من علماء الأحافير **Paleontologists** التفسيرَ التدريجي. اعتنق البعض وجهة النظر القائلةَ إن الديناصورات ماتت في أواخر العصر الطباشيري ببساطة نتيجة نوع من أنواع الظروف البيئية غير المواتية– مثل تغير مناخي أو نظام غذائي سيئ. ظن كثيرون آخرون أن نشاطاً بركانياً كان هو الجاني. وجاء دعم وجهة النظر هذه من مصاطب هضبة الدكن **Deccan Traps** في الهند، التي تشكلت بفعل عدد كبير من النشاطات البركانية التي حدثت في نطاق الفترة التي انقرضت فيها الديناصورات. تغطي مصاطب الدكن منطقة أكبر من نصف مليون كم2 – تعادل حجم فرنسا تقريبا– وهي بسماكة نحو كيلومترين. هذا يعني كثيراً من الحمم. ولتعقيد الأمر أكثر، قد يعود تأريخ الحمم إلى فترة متأخرة من العصر الطباشيري وفترة مبكرة من العصر الثلاثي.

بالتأكيد أنه مع نهاية تلك الحقبة، انقرضت مجموعات من الديناصورات مثل الصوروبودات، مجموعة احتوت على الأباتوصورس Apatosaurus– الاسم الأصلي وربما المفضل حالياً للبرونتوصورس Brontosaurus (وهو جدال يشبه الجدال حول بلوتو). ولكن نشأ الدعم لفكرة التدهور التدريجي جزئيا من سجل الأحافير غير المكتمل الذي عُثر عليه في بداية هذه الدراسات، والذي أصبح أقل إقناعا بعد دراسة المناطق الأخرى والعثور على مزيد من الأحافير. فالأحافير المُكتشَفة في مونتانا على 10-15 قدمت نوعا من الديناصورات على الأقل عاش حتى نهاية العصر الطباشيري. كما قدّمت حفريات حديثة في فرنسا الدليل على ديناصور ضمن 1 متر من الحدّ K-Pg كما أظهرت حفريات في الهند دليلاً على ديناصور تحت ذلك الحدّ أيضاً. وأظهرت أنواع أخرى، مثل الأمونيات، تدهورا في تنوعها في البداية. ولكن الدراسة الأوسع والأقرب كشفت من جديد أن ثلث أنواع الديناصورات على الأقل عاشت حتى ذلك الحدّ– على الرغم من أن بعضها انقرض في وقت سابق.

إضافة إلى ذلك، على الرغم من شيوع الاعتقاد في البداية أن المصاطب قد تولّدت بسرعة كبيرة، أظهرت دراسات لاحقة أن تشكُّلها استغرق عدة ملايين من السنين، وأن الحدث K-Pg يتطابق مع طبقة في الوسط، بدا – ويا للغرابة- أنها زمن نشاط بركاني مكبوح. ربما أكثر الأدلة إقناعاً على أن البراكين لم تكن وحدها المسؤولة عن انقراض الديناصورات هو أن علماء جيولوجيا هنوداً عثروا على عظام ديناصور وشظايا من بيضها في الطبقات الرسوبية وصولا إلى المنطقة التي تُؤلِّف الحدّ K-Pg. لم تكن الديناصورات حية فقط – بل كانت تعيش في منطقة المصاطب نفسها أيضاً.

مع ذلك، تضع تطوراتٌ حديثة تشكل المصاطب في إطار زمني أقرب إلى زمن الانقراض أقرب مما اعتقدناه سابقاً، مما يدعم وجود نشاط بركاني– حتى إن لم يكن مسؤولاً عن الدمار كله. يُخمن البعض أن النشاط البركاني كان في الواقع نتيجة اصطدام نيزكي. في هذه الحالة فإن أي تأثير بركاني كان قد حصل سيُعزَى إلى النيزك أيضاً. مهما كان دورها، فإن البراكين لا تفسر المصادفات العديدة الأخرى في الملامح الجيولوجية التي تحاجج بكل مُقنع لمصلحة اصطدام نيزك.

في الواقع، بمجرد أن بدأ الناس بالبحث بحماس، تراكمت الأدلة التي تدعم فرضية النيزك بسرعة. التفاصيل مهمة ويمكنها أن تساعد على حل الكثير من النزاعات. بعد اقتراح بيركلي في عام 1980، تمت دراسة طبقة الصلصال العائدة إلى K-Pg في إيطاليا والدانمارك وإسبانيا وتونس ونيوزيلندا والأمريكيتين دراسة مستفيضة. مع عام 1982، تمت دراسة 40 موقع حول العالم تقريباً بشكل دقيق. لاحظ عالم الأحافير الألماني يان سميت Jan Smit مستويات عالية من الإيريديوم في إسبانيا، كما قاسها علماء أحافير آخرون في جرف ستيفنز كلينت Stevns Klint. قاس سميت أيضاً مستويات معادن نادرة أخرى مثل الذهب والبلاديوم. فوجد أن مستويات البلاديوم والأوزميوم أعلى من أي مكان وجدت فيه على الأرض بنحو 1,000 ضعف. ومن جديد، تطابقت غزارة المعدن النسبية مع تلك المتوقعة من النيازك.

يقترح بعض العلماء المؤيدين لتفسير البركان أن كميات كبيرة من الإيريديوم قذفتها البراكين من وشاح الأرض ولبها، حيث من المعروف أن مستوياتها هناك أعلى. ولكن البراكين المعروفة لا تطلق ما يكفي من الإيريديوم لتبرر انتشار 50 ألف طن حول العالم والتي حسب ألفاريز وغيره آخرون أنها كانت موجودة في الحدّ K-Pg، حتى مع مراعاة تأثيرات التركيز المحتملة مثل الترسب في المحيطات. بأي حال من الأحوال، الإيريديوم ليس العنصر الثقيل Heavy element الوحيد في الأحجار النيزكية فغزارة العناصر الأخرى لم تتطابق أيضا مع تلك الموجودة في الحمم البركانية أيضاً.

أما الملاحظات الأخرى المرصودة بالقرب من الحدّ K-Pg وحوله فقد قدمت دليلاً إضافياً على نظرية النيزك المقترحة. إذ تعزز دعم فكرة النيزك مع اكتشاف قطيرات صخرية Rock droplets مثل الميكروكريستيت Microkrystites– مادة مصغرة من التكتيت، هي صخور بلورية كروية الشكل تنشأ من الانصهار الناجم بفعل الاصطدام تمركزت حول نفسها وتصلبت في الغلاف الجوي ثم سقطت على الأرض.

ولكن هذه الكريات البلورية Glassy spherules، كما أُطلق عليها في السابق، قدَّمت دليلاً زائفاً في البداية. فالتركيب الكيميائي الذي شابه تركيب قشرة المحيط تبين أنه من المحتمل جدا أن يُمثل الصادم وليس الهدف. لو كان الاستنتاج الأولي المُضلِّل صحيحاً، وكان هبوط النيزك في المحيط وليس على اليابسة، لعنى هذا- على الرغم من الأدلة المتراكمة على الاصطدام- أن موقع الاصطدام ظل مُخْفًى.

هدأ هذا القلق عندما اكتشف علماء الجيولوجيا دليلاً يشير إلى أن النيزك قد هبط على جرف قاري Continental shelf (من المحتمل تعرضه للاصطدام). كان هذا اكتشاف الكوارتز المصدوم، الذي يشير إلى مصدر ضغط عالٍ يمكنه أن ينجم فقط بفعل اصطدام بصخور تحتوي على الكوارتز. تتهشم الصخور التي لا تنصهر، لذا فإن المعادن التي تحتويها يمكنها أن تتحرك لتشكل روابط متقاطعة Crisscrossing bonds (انظر: الشكل 24). المصدر الوحيد المعروف لتشكُّل مثل هذه الروابط هو اصطدامات نيزكية أو انفجارات نووية. وبالطبع لم تُجْرَ اختبارات نووية قبل 66 مليون سنة– على الرغم من أن باحثاً أخبرني بأن مقدِّم برنامج إذاعي قد سأله فعلاً عن هذا الاحتمال– ما يترك الاصطدام النيزكي التفسير المحتمل الوحيد الباقي.

في العام 1984، عندما اكتُشف الكوارتز المصدوم في مونتانا ولاحقاً في نيومكسيكو وروسيا، دعمت هذه الاكتشافات بقوةٍ نظريةَ الاصطدام النيزكي أيضاً. ولما كان الدليل نوعاً من الكوارتز فإن هذا يستلزم أن تكون الفوهة، بافتراض أن هناك واحدة، كانت على اليابسة، باعتبار أن الكوارتز نادر في صخور المحيط.

وتتابعت الأدلة الإضافية بالتراكم لمصلحة فرضية النيزك. إذ اكتشف علماء كنديون ألماساً مجهرياً في الطبقة K-Pg في ألبيرتا. قد يتشكل مثل هذا الألماس بفعل نيازك حملت الألماس من الفضاء الخارجي ببساطة، أو أنها تشكلت بفعل الاصطدام. غيرَ أن الدراسات التفصيلية للحجم ومعدلات نظائر الكربون مالت إلى مصلحة التفسير الثاني. وفي الطبقات الرسوبية في كندا والدنمارك اكتشفت أحماض أمينية غير موجودة في أي مكان آخر على الأرض. كما يتميز هذا الدليل بتأييده تفسيرَ المذنب، نظراً إلى أن هذه الأحماض الأمينية قد وُجدت في الحجر الجيري المتاخم أيضاً– وهو ما سنتوقعه إذا انتثر غبار موجود في المناطق المجاورة زمن تشكُّل الطبقة.

هناك سمة جيولوجية مهمة أخرى أيدت الاصطدامات عالية الضغط، وهي بلورات تسمى اللعْل (السبينل) Spinels. واللعل هو أكسيد معادن يحتوي على الحديد والمغنيزيوم والألمينيوم والتيتانيوم والنيكل والكروم، وله أشكال غريبة على صورة رقاقة ثلج أو جسم ثُماني السطوح، أو أشكال أخرى تدل على التصلب السريع بعد الانصهار عند درجة حرارة عالية. يتشكل اللعل بفعل الصهارة البركانية أيضاً، ولكن اللعل المُكتشَف احتوى على عناصر من النيكل والمغنيزيوم– على عكس اللعل البركاني الذي يحتوي على حديد وتيتانيوم وكروم أكثر. الأفضل من ذلك، تساعد كمية الأكسجين على تحديد مكان تشكل اللعل. أشار اللعل المؤكسد في الطبقة K-Pg إلى منشأ بارتفاع منخفض– ارتفاع أقل من 20 كم. كما وجدت البلورات في طبقة رقيقة فقط، مما يؤكد نظرية أن حدثاً كارثياً قد حصل عند الحدّ K-Pg، وكان حدثا قصيراً.

ولا تعلّل البراكين تشكّل المواد المحرضة بالصدمة. على الرغم من أن البراكين تنتج تشوهات، لا تنتج المناطق البركانية الحالية الكوارتزَ المصدوم بما يتوافق مع المشاهدات من زمن الانقراض. التشوهات في الكوارتز البركاني المصدوم يمتد على مستوًى واحد، وليس على اثنين أو أكثر متقاطعة، وهي ظاهرة تحدث فقط في حال ضغوط صدمية عالية. هذه التفاصيل ضرورية لأن هذه الظواهر وُجدت تحديداً في الأماكن التي تحدد حدّ الانقراض K-Pg.

مع ذلك، بعد أن أثبتنا بنحوٍ راسخ التأثيرَ التدميري للنيزك، وينبغي ألَّا نستبعد وجهة النظر التدريجية استبعادا كاملا. من المرجح جداً، أن الظروف كانت آخذةً في التغير في نحو زمن الانقراض K-Pg بطريقة زادت من ضعف النظام الإيكولوجي بحيث عندما ضرب نيزكُ الأرضَ، سبَّب مزيداً من الضرر أكثر مما كان سيسببه في ظروف أخرى. تُبين الأدلة أن جزءاً كبيراً من الأنواع قد انقرض حتى قبل حدَث الانقراض المفاجئ. تقدم القياسات الحيثية الأكثر دقة عن توقيت مصاطب الدكن دعماً إضافياً لدور ما لنشاط بركاني. وإن كان من غير المرجح أن يكون مسؤولاً عن حدث الانقراض الذي حصل في النهاية، ولكن البراكين والظواهر الأخرى حرضتها في الغالب– قبل الاصطدام النيزكي وبعدَه.

ولكن من أجل إلحاق أضرار جسيمة، لم يحتج الاصطدام إلى أي مساعدة.

كيف تضعضعت الحياة

من الصعب تخيُّل مدى جسامة وكارثية النيزك. كان طول الجرم الصادم يفوق عرض مانهاتن بثلاثة أضعاف تقريباً. لم يكن عملاقاً فقط. بل كان ينتقل بسرعة كبيرة أيضاً– 20 كم/ث على الأقل، وإذا كان مذنباً فربما بأسرع من ذلك. كانت سرعة الجرم تفوق 700ضعف سرعة سيارة تسير في الطريق السريع بسرعة 100 كم/س. سيكون هذا الصادم جرماً بحجم مدينة رئيسة تتحرك بسرعة تفوق سرعة مركبة تسير على الطريق السريع بنحو 500 ضعف. ولأن الطاقة التي يحملها الجرم تزداد طرديا مع كتلته ومربع سرعته، فسيسبب هذا الجرم العملاق والسريع الذي يضرب الأرض اصطداماً هائلاً وكارثياً.

لكي نضعها في منظور يمكن تخيُّله، أي عنصر بحجمه وسرعته سيطلق طاقة تُعادل ما يصل إلى 100 ترليون طن من TNT، أي أكثر من القنابل الذرية التي دمرت هيروشيما وناغازاكي ببليون ضعف. المقارنة ليست مصادفة. عمل لويس ألفاريز على مشروع مانهاتن وذكر ملاحظات مماثلة. عموما، الانشغال بالحرب الباردة مع تأثير الانفجارات النووية عززا من اهتمام الناس بالفوهة. استفادت الأبحاث في الموضوعين من المعرفة المتزايدة حول تأثيرات الصادم K-Pg البيئية طويلة الأمد.

حمل جرم تونغوسكا Tunguskaوالحجر النيزكي الذي أنشأ الفوهة الشهابية في أريزونا جزءاً من هذه الطاقة– ما يعادل ربما 10 ميغا طن من TNT. كان قطر الصادم في كل من الحالتين يُعادل تقريباً 50 م، بينما كان قطر الصادم الذي سبب الحدث K-Pg نحو 10-15 كم. أما طاقة كراكاتاو Krakatau فكانت أكثر بعدة

أضعاف فقط من طاقة النيازك الأصغر،والقريبة من قوة أقوى الأسلحة النووية التي صُنعت على الإطلاق (نحو 50 ضعف ما هو موجود الآن). سيكون نيزكٌ بعرض 1 كم كبيراً بما يكفي ليسبِّب ضرراً عالمياً. والجرم الذي اقترحه ألفاريز كان أكبر من ذلك بنحو عشرة أضعاف على الأقل- أكبر من ارتفاع قمة إيفريست، التي تنتصب على ارتفاع تسعة كيلومترات فوق مستوى سطح البحر.

كان اصطدام وتأثير هذا الجرم العملاق والسريع كارثياً. كما شرحنا آنفاً في الفصل الحادي عشر، توالت كوارث عديدة في إثر هذه الصخرة العملاقة الثقيلة التي دفعت نفسها نحو الأرض. بالقرب من الانفجار- ضمن قطر يعادل نحو ألف كم- ثارت أمواج ورياح عاتية، وتشعشعت موجات تسونامي Tsunami ضخمة من موقع الانفجار. كانت هذه الموجات الزلزالية قوية جداً، وإن كانت محدودة النطاق، إذ تبين أن عمق الماء في موقع الاصطدام كان نحو مئة متر. وارتفعت موجات مدية Tidal waves أيضاً في الطرف المقابل من الكرة الأرضية، مُحرَّضة ربما بفعل أشد زلازل تعرضت لها الأرض على الإطلاق. وهبت رياح عاتية نحو الخارج من موقع الاصطدام، ومن ثم عادت إلى الداخل بسرعة. أثار هذا سحابة من الغبار والرماد والبخار شديد السخونة الذي ارتفع عندما دخل النيزك إلى الأرض في البداية. امتصت الرياح والماء نحو 1% من طاقة الاصطدام. أما الباقي فقد ذهب في الانصهار والتبخر وإرسال موجات زلزالية تخلّلت الأرض- ما يعادل 10 على مقياس ريختر.

قذفت ترليونات الأطنان من المواد من موقع الفوهة وتوزعت في أماكن أخرى. بعد ذلك، عندما هبطت الجسيمات الساخنة الصلبة عبر الغلاف الجوي، ربما ارتفعت حرارتها إلى حد التوهج، ورفعت درجة الحرارة حول الكرة الأرضية. ونجمَ عن ذلك أن اشتعلت الحرائق في كل مكان وطُهي سطح الأرض حرفياً. الواقع أنه في العام 1985، وجدت الكيميائية ويندي ولباخ Wendy Wolbach وزملاؤها دليلاً على الحرائق في الطبقة K-Pg على شكل فحم وسخام. أكدت غزارة وشكل بقع الكربون التي وجدوها على أن النيران قد اشتعلت- وأتلفت الحياة النباتية والحيوانية الموجودة حينها. استنتج الباحثون أن أكثر من نصف الكتلة الحيوية Biomass قد احترقت خلال أشهُر من الاصطدام.

وهـذا ليس كل شيء. تسمم المـاء والهواء والتربة. ربما لم يكن النـاس مخطئين في خوفهم من المـذنبات، التي تبين أنها تحتوي على موادَّ سـامة مثل السيانيد والمـعادن الثقيلة بما فـيها النيكل والرصاص. على الـرغم من أن بعض المـواد الكيميائية قـد تبخرت قبل أن تـسبب أي ضرر، يـظل من المحـتمل جداً أن المعـادن الثقيـلة هطلت من السماء.

ربما كان الأكثر ضرراً هو أكسيد النتروز Nitrous oxide في الجو، الذي هبط على الأرض في شكل مطر حمضي. وانبعث الكبريت في الجو أيضاً، وصنع حمض الكبريت الذي بقي هناك وحجب ضوء الشمس، ما أدى إلى تبريد عالمي مباشرة في أعقاب التسخين العالمي الذي حدث بعد الكارثة واستمر ربما سنوات. انعكست الخسارة في البناء الضوئي Photosynthesis على السلسلة الغذائية. ربما أدى الاحترار العالمي Global warming وجسيمات الغبار التي سربلت الأرض دوراً أيضاً- مُطيلة أمدَي الحرارة والبرودة غير الاعتياديتين سنوات عديدة أخرى.

في الواقع، يبين سجل الأحافير أن بقايا الدمار استمرت فترة طويلة بعد الاصطدام. حتى الأنواع التي نجت تضاءلت بقدر حاد. لم تتعافَ المحيطات مئات آلاف السنين وفي الغالب شهدت تأثيرات كارثية امتدت من نصف مليون إلى مليون سنة أخرى على الأقل. يبين سجل الأحافير غياب البلانكتون وأحافير أخرى في الحجر الجيري الذي احتوى على القليل من الكربون أو لا شيء منه. بدلاً من ذلك هناك دليل على جسيمات حتاتية Detrital particles بنحو أساسي- الأجزاء الصغيرة من الصخور المنحوتة والمتجوية التي بقيت. لا يظهر اللون الطبيعي في هذه الطبقات إلا بعد عدة سنتيمترات وأحياناً أمتار، بحسَب المكان الذي يبحث المرء عنها فيه على الكوكب.

هيأت الكوارث العديدة فرصاً وافرة للنباتات والحيوانات لتنقرض. يبدو أنه لم ينجُ أي مخلوق يزن أكثر من 25 كغم- وزن كلب متوسط. من أجل النجاة، كان لا بد من طريقة للاختباء من الكارثة- سواء بالسُّبات أو

غير ذلك. وفقا لطريقة تكاثرها (للبذور فرصة أقوى في النجاة أكثر من غيرها من وسائل التكاثر) تمكنت بعض الأنواع من النجاة. والحيوانات التي استطاعت أن تهرب إلى السماء كان لها فرصة أفضل أيضاً. ولكن نفق معظم النبات والحيوان. لقد كان نيزك بعرض 10 إلى 15 كم كارثياً– للبيئة وللحياة.

إصابة قلب الهدف: إعادة اكتشاف الفوهة

على الرغم من ذلك، علم الباحثون في ذلك الزمن أنه حتى مع كل الأدلة المُكتشفة في ثمانينات القرن العشرين، ومع الفهم المتزايد لتأثيرات نيزك عملاق في الحياة وفي الأرض، فإن إيجاد فوهة كبيرة تعود إلى 66 مليون سنة بالحجم الصحيح سيعزز بنحوٍ واضح اقتراحَ الاصطدام. لن تبرهن الفوهة على صحة الفرضية فحسب، ولكنها ستفسح المجال لمزيد من البحث الدقيق الذي يمكنه أن يثبت حجم وزمن اصطدام النيزك، إضافةً إلى خواصَّ أخرى يمكنها أن تساعد على تأكيد الاصطدام.

كان حجم الفوهة– إضافة إلى عمرها– تنبؤاً حاسماً. فبالاستناد إلى كمية الإيريديوم المَقِيسة، استنتج وولتر ألفاريز أن النيزك يجب أن يكون بعرض 10 كم، لذا يجب أن تكون الفوهة بعرض 200 كم تقريباً، لأن الفوهات تكون عادة أكبر بـ 20 ضعفاً من حجم الجرم الصادم. لم يكن ألفاريز هو الوحيدَ الذي قدر الفوهة بهذا الحجم. تنبأ عالم أحافير آخر، وبطريق مستقل، بأن يكون الحجم 180 كم بالاستناد إلى افتراض أن الطين قد احتوى على 7% من الحجر النيزكي، والباقي صخر مسحوق من الهدف.

والعثور على فوهة بالحجم الصحيح والتاريخ الصحيح هو الدليل القاطع على فرضية ألفاريز. ومع ذلك استغرق الأمر أكثر من عَقد من الزمن لاكتشاف الفوهة – لتولد واحدة من أعظم قصص التحري في العلم المعاصر. في الواقع، لم تكن فرص إيجاد موقع الاصطدام تبدو مواتية في البداية عندما بدأ الناس البحث عنها. على الرغم من اكتشاف بعض الفوهات الضخمة في السنوات السابقة، بَيدَ أننا لم نعثر على كثير غيرها. حتى إن كنا "محظوظين" بما يكفي لأن يضرب النيزك اليابسة وليس المحيط، فقد يزيل الحت أو الطمر تحت الطبقات الرسوبية أو التدمير التكتوني أي آثار تدل على تشكُّل فوهة.

تفاقَم تحدي اكتشاف النيزك المسؤول عن الحدّ K-Pg بالافتقار الواضح إلى أدلة على موقع الاصطدام. انتشار الإيريديوم في كل مكان والأدلة الجيولوجية الأخرى التي توزعت بتساوٍ تقريباً على جميع أنحاء الكرة الأرضية، أكدت التأثيرَ العالمي للنيزك، ولكنها لم تُشر إلى منطقة مُحدّدة على وجه الخصوص. عندما انطلق البحث في البداية، بدا تحديد الموقع الذي ضرب فيه نيزك معينٌ الأرضَ قبل 65 مليون سنة مهمة مثبطة، إن لم تكن مستحيلة.

لكن لمصلحة صائد الفوهات، دل الكوارتز المصدوم الذي عثر عليه أن منشأه قاري– أو من جرف قاري– لذا كان للبحث على اليابسة الفرصة في التعرف بنجاح على بقايا الجاني. ظهرت عدة فوهات مرشحة وبدت واعدة في البداية، ولكن سرعان ما استُبعدت عند الدراسة المعمقة– عدم التوافق مع قياسات دقيقة حول زمن اصطدامها، أو حجمها، أو نتائج دراسات علم المعادن.

ولكن أُغفِلت واحدة من أهم الملاحظات المستقلة برهة من الزمن. في خمسينات القرن العشرين، تعرف الجيولوجيون الصناعيون على بنية دائرية مطمورة قطرُها 180 كم امتد نصفها على الساحل تحت سهول يوكاتان الجيرية، ونصفها في الماء، حيث طمرت تحت الماء والرواسب في خليج المكسيك. حفر الجيولوجيون- من شركة النفط بتروليوز مكسيكانوس Petróleos Mexicanos، أو بيميكس Pemex كما تعرف شركة البترول المكسيكية اختصاراً- آباراً في هذه المعالم. ووجدوا صخوراً بلورية على عمق نحو 1,500م، مما جعلهم يعتقدون أنهم عثروا على دليل لبركان وليس ما كان بالنسبة إليهم مصطبة نفط.

ولكن في أواخر ستينات القرن العشرين، اقترح الجيولوجي روبرت بالتوسر- القائم على الدورة الثانية من التنقيب الاستكشافي، في حال أغفل المستكشفون الأوائل جيبا نفطيا- أنها يمكن أن تكون في الواقع فوهة صدمية. كان اقتراحه مَبنياً على قياسات شكل طاقة وضع الجاذبية Gravitational potential للمعالم- كيف تباينت قوة الجاذبية في الأجزاء المختلفة من البنية الدائرية. ولكن مع ذلك لم يكن بترولاً ومن ثم لم تسمح له بيميكس بنشر مشاهداته الرصدية. ونتيجةً لذلك كان معظم من علم عن البنية يعملون في صناعة البترول، التي قامت لأسباب واضحة بكثير من الاستطلاعات المفصلة في قاع المحيط، ولكنها أرادت أن تحمي نتائجها.

ولكن بيميكس كانت مثابرة في بحثها عن النفط حتى أجرت في سبعينات القرن العشرين دراسات جيولوجية، بما فيها مسحُ المغناطيسية جويا فوق شبه جزيرة يوكاتان كاملةً. لاحظ المستشار الأمريكي غلين بينفيلد Glen Penfield انحرافاً قوياً نحو 50 كم عرضاً تتاخمه حلقة خارجية بمغناطيسية منخفضة بنحو شاذ بقطر نحو 180 كم. كان هذا تحديداً هو نمط فوهة صدمية كبيرة، حيث ترتبط المنطقة المركزية بصهارة الاصطدام وتحتوي المنطقة الخارجية على حطام متصلب. لم يكن هذا التوافق ليخفَى على بينفيلد. وقدمت بيانات مسح الجاذبية جويا دعماً إضافياً لهذا التفسير. ارتبط الحقل المغناطيسي العالي والمنخفض مع تباين الإشارات المغناطيسية.

وهكذا في أوائل العام 1978، كانت لدى بينفيلد دلالة منطقية على وجود فوهة صدمية. أدرك أن هذا الدليل على حادثة اصطدام سابقة غير معروفة يمكنها أن تكون أمراً مهماً، لذا أخذ إذناً من بيميكس للإفصاح عما يُعتبر عادةً بيانات محمية بالملكية الفكرية. قدَّم بينفيلد، مع الجيولوجي أنتونيو بامارغو Antonio Camargo من بيميكس، نتائجه في العام 1981 في مؤتمر جمعية علماء الجيوفيزياء الاستكشافية Society of Exploration Geophysicists في لوس أنجلوس. ولكن الاكتشاف لم يلقَ اهتماماً كبيراً. فمعظم المستمعين لم يكونوا مدركين لفرضية الاصطدام المسبب للانقراض K-Pg، لذا لم يكن أحد ليعيَ هذا الترابط.

في الواقع، لم ينكب معظم الأشخاص المهتمين في تحديد مكان الفوهة الصدمية المسؤولة عن الانقراض K-Pg على دراسة هذه الفوهة على وجه التحديد حتى العام 1990. أما كيف وصلوا إليها فهذه قصة مذهلة أيضاً. فالباحثون عن فوهة معينة تعود إلى 66 مليون سنة بقطر نحو 200 كم، لإثبات صحة نظرية ألفاريز، كانوا قد باشروا البحث من منظور مختلف تماماً عن منظور علماء الجيولوجيا في شركة بيميكس. فقد درسوا الطبقة K-Pg للبحث عن إشارة إلى مكان الاصطدام. على الرغم من تجانس ترسبات الإيريديوم حول العالم، وأدركوا حاجتهم إلى دليل واحد- إن وجد- سيعد أكثر تحديداً للموقع. إذا ضرب النيزك المحيطَ واستقر بالقرب من الشاطئ، فسيولد تسونامي قوياً بما يكفي ليترك أثره في الجرف القاري. ربما بدا هذا تفكيراً خياليا نظراً إلى الدليل على أن الاصطدام وقع على اليابسة، ولكن الجيولوجيين أبقَوا أعينهم مفتوحة وكُوفئوا على جهودهم.

في العام 1985، درس يان سميت وزميل له بروزاً لترسبات مضطربة في الطبقات الرسوبية K-Pg في حوض نهر برازوس في تكساس بالقرب من خليج المكسيك، الذي كانا مقتنعين بأنه تَشكل بفعل التسونامي المقترح. وأكملت عالمة الجيولوجيا جوان بورجوا Joanne Bourgeois من جامعة واشنطن عملهما، فوجدت حجارة رملية خشنة غريبة تحتوي على أجزاء من صدف وخشب متأحفر وأسنان سمك وصلصال يتطابق مع قاع البحر المحلي- وقدّرت أن عمق المكان قبل 66 مليون سنة كان 100 م تحت مستوى سطح البحر في ذلك الزمن. كانت قادرة على استعمال حجم كتل الحجر الرملي لتقدير أن التيار كان يجري أسرع من 1م/ث، ما يتماشى مع ارتفاع في الموج يصل على الأقل إلى 100 متر، ووجدت إضافةً إلى ذلك صلصالاً مطبوعاً بنمط يدل على أن التيار كان يجري من الشاطئ وإليه. بافتراض أن أقصى حجم يمكن أن يصله الموج هو عمق البحر نفسه الذي يصل في هذه الحالة إلى 5,000 م، استخلصت بورجوا أن الاصطدام يجب أن يكون على بعد أقل من 5,000 كم من موقعها، أي في خليج المكسيك أو الكاريبي أو الأطلسي الغربي.

جاء التلميح الآخر عن المكان من الجيولوجيَّين بروس بوهور Bruce Bohor وغلين إزيت Glen Izett، اللذين وجدا في العام 1987 أن أغزر ترسبات للكوارتز المصدوم كانت في غرب المنطقة الداخلية من أمريكا

الشمالية، ما يدل على حصول اصطدام بالقرب من القارة. كان هذا يتوافق مع تحليلات سميت وبورجوا، التي أشارت إلى أن الاصطدام كان بالقرب من الطرف الجنوبي من القارة.

ضُيِّق موقعُ الاصطدام أكثر عندما تعرف الجيولوجي الهاييتي فلورنتين موراس Florentin Maurrasse على بعض البقايا من طبقة الحدّ K-Pg في بلاده. وقد لفت وصفه للرسوبيات الغريبة اهتمامَ طالب الدراسات العليا آلان هيلدبراند Alan Hildebrand من جامعة آريزونا، والمشرف على أطروحته بيل بوينتون Bill Boynton، والباحث ديفيد كرينغ David Kring. على الرغم من أن موراس قد وصف البقايا بأنها بركانية المنشأ، كان فريق آريزونا مدركاً مدى إمكانية اللبس بين البقايا البركانية وبقايا اصطدام. وما كادوا يرون العينة الهاييتية، حتى لاحظوا التكتيت، وقرروا زيارة هاييتي بأنفسهم. هناك، في العام 1990، وجدوا بروزاً رسوبياً بسماكة نصف متر بدا أنه يحتوي على التكتيت- وكوارتز مصدوم وصلصال إيريديوم أيضاً. بدت هذه منطقة مرتبطة في الغالب باصطدام نيزكي. من سماكة الطبقة، استنتجوا أن الفوهة يجب ألا تكون أبعد من نحو ألف كيلو متر عند زمن الاصطدام.

في البداية أيّد هيلدبراند موقعا مرشحاً في الكاريبي ثم استبعده لاحقاً، في النهاية حدد فريق آريزونا نقطة الصفر في معلم يوكاتان الذي تُعُرِّف عليه قبل عقد. مع ذلك لم يكن العلماء هم أول من ربط الأمرين معا، بل صحافي يُدعَى كارلوس بايرز Carlos Byars من صحيفة هيوستن كرونكلز. بعد الاستماع إلى محاضرة هيلدبراند مستعرضا بحث فريق آريزونا في اجتماع علمي، أخبره بايرز عن اكتشاف بينفيلد السابق لفوهة صدمية محتملة- ما ساعد العلماء على الوصول إلى الفوهة المفقودة.

كانت الفوهة التي اكتشفتها بيميكس في المكان الصحيح. وكانت بالحجم الصحيح أيضاً. كان هذا التوافق نقطة بارزة لمصلحة ارتباط الفوهة بالانقراض K-Pg. ومع ذلك، عندما قدم هيلدبراند في العام 1990 ملخصين يقترح فيهما الارتباط لمجلة علمية، لم يُنشَرا- جزئياً لأن الدليل الأولي لم يكن مقنعاً بما يكفي. لكن، الآراء تغيرت عندما تعرف فريق آريزونا على كوارتز مصدوم من الفوهة.

لأن الفوهة كانت تقع في الجرف القاري المغمور فقد غطتها الرواسب، ما جعل من الصعب العثور على الفوهة ودراستها. ولكن طمرَها كان مفيداً من بعض النواحي أيضاً، لأن الألف متر من الطين المتصلب فوقها حمى الفوهة من الحت الذي كان من الممكن أن يحدث لو أنها كانت على السطح. من أجل دراسة الفوهة المدفونة، والتي من ثم يصعب الوصول إليها في البداية، تَواصل علماء أريزونا مع بينفيلد وكامارغو لدراسة العينات الأسطوانية المحفورة من قبل. وحصلوا على عينتين بحجم الإبهام كانتا محفوظتين في نيو أورلينز. عندما درست مجموعة أريزونا العينات المنقبة القديمة من شركة بيميكس، وجدوا ما كانوا يبحثون عنه. إذ تعرفوا على كوارتز مصدوم وصخور مصهورة بفعل اصطدام؛ مما بيّن أن الفوهة كانت بسبب اصطدام وليس بركان. أعلن كرينغ الاكتشاف في مركز جونسون للفضاء Johnson Space Center التابع لناسا في مارس 1991.

جمع علماء آريزونا دراسات العينات المنقبة مع البيانات الجيوفيزيائية التي قدمها بينفيلد وكامارغو والفرق البحثية الأخرى- إضافة إلى مشاركين آخرين- دليلاً قوياً بأن الفوهة كانت نتيجة اصطدام أطلق الانقراض الجماعي في العصر K-Pg. ونشروا هذه النتيجة، إضافة إلى الحجم المقدَّر بـ 180 كم في الدورية العلمية جيولوجي Geology في العام 1991. تنبه عديد من العلماء بعد مواجهتهم بالكوارتز المصدوم والأدلة المساندة.

سَمى فريق آريزونا الفوهة باسم مرفأ صيد مجاور صغير صعب اللفظ للأسف، تشيكشولوب بويرتو Chicxulub Puerto، والذي كان يقع فوق مركز البنية الجيولوجية. يترجم المصطلح الذي يُنطَق CHICK- shuh- lube أحياناً إلى Devil's tail (ذيل الشيطان)- المناسب بما يكفي للسمة المَهيبة التي وصفها وولتر ألفاريز باسم "فوهة الهلاك".

وسريعا بعد نشر فريق آريزونا نتائجَه، أدرك خبراء الاستشعار من بُعد أنهم يستطيعون التقاط محيط الفوهة في صور الأقمار الاصطناعية، إذ تنتشر برك صغيرة في شكل حلقة حول الفوهة، ضمن قُطر بطول 80 كم. في غالب الأمر أن هذه قد تشكلت بسبب شكل الفوهة، التي ستجعل المياه الجوفية تجيش نحو الأعلى وتشق سطح الأرض، وكانت من ثم دليلاً إضافياً على الفوهة.

وتلا ذلك مزيدٌ من الدعم. فقد برهن علماء آريزونا على أن المادة الموجودة في العينات القديمة كانت صهارة صدمية احتوت على خواص تشبه الميكروتكتيت الموجودة في الطبقات الرسوبية K-Pg في الخليج المحيط بها. لاحظ كرينغ وبويتون أيضاً تشابهات كيميائية بين صخور تشيكشولوب المنصهرة والكريات البلورية المترسبة في الحدّ K-Pg في هاييتي- وهو دليل دامغ على أن فوهة تشيكشولوب قد نشأت تحديداً في الحدّ الطباشيري-الباليوجيني، حيث انعدمت الحياة. أصبح الدليل قوياً جداً عند هذه المرحلة إلى درجة أن الاكتشاف تصدر العناوين وصار متداولاً من قِبل الجمهور.

تابع علماء الجيولوجيا البحث لإيجاد مزيد من الروابط بين فوهة يوكاتان والانقراض K-Pg. بالقرب من الفوهة تماماً عند الحد الأيمن، تعرف يان سميت وولتر ألفاريز على نوع البروز الجغرافي تماماً- حوض بريشيا يحتوي على كريات وزجاج. كان اكتشاف الزجاج مهماً أيضاً. يتكون الزجاج فقط في أثناء عمليات سريعة مثل اصطدام، وليس خلال عمليات بطيئة نسبياً مثل البركان، حيث يتاح للذرات والجزيئات الزمن الكافي لتتبلور. وكانت الخطوط في الزجاج إشارة إلى أنه تشكَّل بسرعة أكبر من أن يتوافر له الوقت الكافي كي يتجانس.

كشفت الاستكشافات والمحادثات مع علماء جيولوجيين مكسيكيين عن أماكن أخرى تشكلت أيضاً بفعل الاصطدام القريب نسبياً. كما أظهرت الدراسات أيضاً أن سماكة مقذوفات الحدود Boundary ejecta في أمريكا الشمالية تنخفض مع الابتعاد من الموقع تماماً كما هو متوقع بافتراض تشيكشولوب هو المصدر. وساعدت الجيولوجية سوزان كييفر Susan Kieffer بتفسير التوزع النسبي للإيريديوم وصهارة الاصطدام والكوارتز المصدوم وذلك بفعل دفعات متلاحقة من الانفجار.

مع حلول العام 1992، نظراً إلى جميع الأدلة المتجمعة، اقتنع معظم علماء الجيولوجيا بأن مَعلم يوكاتان هو بالفعل فوهة صدمية. ولكنهم مع ذلك لم يكونوا متأكدين من علاقته بالانقراض K-Pg. سيكون التأريخ الدقيق، الذي يتطلب دراسة التركيب الكيميائي لعينات عالية الجودة من الفوهة، هو الطريقةَ الوحيدة لإثبات الارتباط.

نجح العلماء في تحديد عمر العينات – على وجه التحديد في ثلاث خرزات من الزجاج المحفوظة بعناية- وذلك بدراسة نظائر الآرغون Argon في الصخور. عندها أرّخوا الكريات Spherules من الطبقة K-Pg الهاييتية ليتحققوا من توافق زمن الاصطدام مع الانقراض. عندما قدر القياس الأول العمر بـ 64.98-/0.05+ مليون سنة والقياس الثاني قدره بـ 65.01-/0.08+، أثبتت النتائج أن الأحداث قد وقعت بتزامن (ضمن مقدار شك المقياس). أقنع هذا التوافق الممتاز كثيراً من العلماء بصحة نظرية انقراض الديناصورات بسبب نيزك التي وضعها بدايةً ألفاريز وزملاؤه. وقعت المقذوفاتEjecta بالضبط على الحدود الأحفورية Paleontological boundary، مما أكد أن الاصطدام قد حدث في زمن الانقراض.

لكن تبين أن التأريخ الأولي لكل من الفوهة وطبقة الإيريدوم- الحاسمة في إثبات العلاقة السببية Causal relationship- يختلف بنحو مليون سنة. التواريخ النسبية لم تتغير، ولكن ثوابت التحلل Decay constants الضرورية لتحديد عمر معين كانت مغلوطة بنحو طفيف. لهذا السبب نعرف الآن أن الانقراض K-Pg قد حصل قبل 66 مليون سنة- وليس 65.

الدليل الأكثر برهنةً على فرضية النيزك هو التطور الحديث المهم في قياس تقارب التواريخ. في فبراير 2013، بيَّن الباحث بول ريني Paul Renne من جامعة كاليفورنيا، بيركلي، وزميله أن اصطدام تشيكشولوب والانقراض الجماعي قد حدثا بفارق أقل من 32 ألف سنة، وهو قياس دقيق مذهل لأحداث حصلت منذ زمن

بعيد. استخدم الفريق تأريخ أرغون-أرغون Argon-argon dating– تقنية تعتمد على نظائر آرغون مُشعَّة ذُكِرت في الفصل السابق– لتبيان أن الاصطدام والانقراض قد حصلا ضمن هذه الفترة الزمنية القصيرة.

لم يكن تقارب التواريخ التي وجدوها مجرد مصادفة، وكان إثباتاً مذهلا على فرضية الاصطدام. على الرغم من أن مؤلفَي الدراسة كانا حريصين على الإشارة إلى أن حدث الاصطدام النيزكي قد يكون مسمارا في نعش انقراض كان قد بدأ بالفعل بسبب نشاط بركاني أو تغير مناخي، أصبح الاصطدام النيزكي العملاق الذي أدى إلى تشكُّل فوهة تشيكشولوب هو بلا شك المحفز الحاسم للانقراض.

في مارس 2010، اجتمع 41 خبيراً في علم الأحافير والجيوكيمياء ونمذجات المناخ والجيوفيزياء وعلم الطبقات الرسوبية لمراجعة أكثر من 20 سنة من الأدلة على فرضية الاصطدام والانقراض الجماعي التي تراكمت حتى ذلك الوقت. وتوصلوا إلى أن اصطداماً نيزكياً بالفعل هو ما أنشأ الفوهة وأثار الانقراض K-Pg، بأكثر ضحاياه شهرة– الديناصور الضعيف. نُشرت مقالة في الدورية العلمية ساينس Science في تلك السنة مستعرضة إجماع الآراء على أن نيزكاً كان السبب وراء الانقراض. بعد عدة أشهر، وفي الدورية نفسها، نشر مجموعة من علماء الأحافير المشككين مقالةً أخرى وافقوا فيها على أن النيزك هو على الأقل عامل مساهم مهم جداً.

فوهة تشيكشولوب هي من بين أكبر الفوهات الموجودة على الأرض. كانت قصة اكتشافها مثال على عمل العلم، واحتوت على استنتاجات ذكية، واختبارات وإثبات صحة فرضيات جريئة، واستكشافات في مناطق متباعدة في كل من إيطاليا وكولورادو وهاييتي وتكساس ويوكوتان. كان للنيزك الذي ضرب في يوكوتان أثر بليغ في الكوكب وفي الحياة عليه. يوضح أصله وعواقبه ببراعةٍ الروابط الثابتة للأرض بالكون.

13

الحياة في النطاق الصالح للحياة

لقد قطعنا شوطاً بعيداً في رحلتنا نحو النظرية التي تقترح كيف قد ترتبط المادة المعتمة بغياب الديناصورات التي تعيش على اليابسة. لقد تعرضنا لكثير مما هو معروف عن الكون، والمادة فيه، وتطور البنى مثل المجرات. وعلى الأرض، تعرفنا على أحداث الانقراضات الخمسة البارزة، بما فيها حكاية الكارثة K-Pg والمدروسة دراسة مستفيضة، وتحرينا عن تركيبة المجموعة الشمسية بالتركيز على الاكتشافات الأخيرة فيما يتعلق بالنيازك والمذنبات.

ولكن التطور في العلم لا يشتمل على ما هو معروف فقط. بل من الضروري أن يشتمل على ما هو غير معروف أيضاً. تبدأ الفرضيات عادة بمحاولات تنبُّئية لفهم أدلة هامشية ولكن ذات دلالات مهمة، أو– في لحظات ملهمة– لتوليد أفكار جديدة رائدة. يكمن جمال المنهج العلمي في أنه يترك لنا الفرصة لنفكر في مفاهيم قد تبدو مجنونة، ولكن بعين ترصد النتائج الصغيرة والمنطقية التي تختبرها. قد نكون محظوظين وتُمهد أفكارُنا الطريق قدماً، ولكن قد نشعر بخيبة الأمل عندما تُثبت عدمَ صحة فرضية قد تبدو واعدة في البداية بعد أن ضللتنا طويلاً.

نادراً ما يكون التطور مباشرا. ربما عُبِّر عن هذه الفكرة بحماس مبالغ فيه ضِمْن سياق آخر من قِبل صديق لي يتزلج أحيانا ولكن بحماس. عندما التقيته على منحدرات التزلُّج، وصف لي تطوره بأنه "خطوتان إلى الأمام، وخطوتان إلى الخلف". ولكن حقاً، حتى عندما ظن أنه لم يكن يطور تقنياته، فإن قضاءه مزيداً من الوقت على الجليد يجعله يتآلف مع الجبل ومع تضاريسه مما يساعده مساعدة مفيدة في مغامرات تزلُّج في المستقبل. بالفعل، عندما صادفتُه بعد سنة في الجولة نفسها، وجدتُ أن مستوى تمكُّنه تحسن تحسُّناً ملحوظاً.

ولكن أي أحد يشتغل بالبحث العلمي قد يدرك سلوكه هذا الذي عبر عنه. حتى الشخص الذي لم يرتكب أخطاء، وعمل على حل معادلاته حلاً سليماً، وفسر البيانات تفسيراً ملائماً، قد يجد في المحصِّلة أن الفكرة التي اقترحها– حتى إن لم تكن بخطأ منه– غير ملائمة للكون الفسيح. حتى عندها، كما التزلج، يجب أن تثمر المحاولات على الأقل فهماً أكثر قرباً للتفاصيل. قد يجد باحثنا الخيالي بعض الطمأنينة في معرفة أنه تعلم شيئاً من أفكاره الخاطئة أيضاً– على الأقل الأفكار الخاطئة الصحيحة– حتى إن لم تبدُ كذلك في ذلك الوقت. ابتكار الفرضيات وإيجاد الطرق لإثبات أو دحض أفكار هما- في النهاية– الطريقة الوحيدة للتأكد من صحتها. في تلك الأمثلة الرائعة عندما تكون المقترحات محظوظة أو ملهمة، يؤدي البحث إلى تقدُّم حقيقي. بالنسبة إلى عالِم ما – وبالنسبة إلى الجميع أيضاً– تضمحل الإخفاقات عندما تواجَه بالنجاح.

قريباً جداً سيتطرق هذا الكتاب إلى بعض الأفكار التنبئية حول المادة المعتمة. ولكن هذا الفصل سينتقل بإيجاز إلى إحدى أكثر النتائج إثارةً المترتبة على وجود مادة نعرف تركيبها جيداً– ألا وهي نشوء وتطور الحياة. سأشرح بعض العوامل التي قد تكون مهمة لأصل الحياة: الظروف البيئية التي تلائم الحياة، والدور المحتمَل للنيازك في تطور الحياة. على الرغم من أن الأفكار التي أناقشها مدعومة بالبحث العلمي، إلا أنني أضفتُ أيضاً بعض النواحي التنبئية. وهذه عادة تتعلق بمدى أهمية خاصية ما للحياة على الأرض أو مدى أهميتها لأشكال جديدة من الحياة قد توجد في مكان آخر.

تركيزنا على المادة المألوفة لا يقترح أنه ليس هناك عديد من الأفكار التنبئية حول المادة المعتمة أيضاً، ولكن سأضع هذه جانباً في الوقت الحالي لأعود إليها في الجزء الأخير من الكتاب. ومع ذلك يجب ألا نهمل تماماً امتنان الحياة للمادة المعتمة ولدورها في تكوين بيئتنا النجمية– نتيجة قرص متكثف من المادة العادية حفّز نشوء مجرة بذرها في الأصل تكثُّف المادة المعتمة. بذر هذا الهيكل الذي هيّأ تكوُّن النجوم والنوى الثقيلة، التي

ما كانت لتتكون في الوقت المناسب لولا مساهمة المادة المعتمة. يعود الفضل إلى المادة المعتمة أيضاً في المساعدة على جذب العناصر الثقيلة- التي تكونها السوبرنوفا (المستعرات) والتي هي ضرورية لكوكبنا وللحياة- نحو المجرات والعناقيد المجرية Galaxy clusters.

ولكنها كانت رحلة طويلة من هالات المادة المعتمة إلى خلق الحياة. كان يجب أن يتكون قرص درب التبانة، ومن ثم النجوم وعناصر ثقيلة وبنى معقدة أخرى. كانت المادة العادية أساسية في كل هذه العمليات المعقدة والبارعة التي بدت المجموعة الشمسية ملائمة لها. لا يمكنني أن أقول أي من هذه الأفكار التنبئية عن تشكل الحياة هي الصحيحة. ولكن يسعني القول بكل يقين إن العلم في السنوات المقبلة سوف يتقدم كثيرا.

بداية الحياة

أصل الحياة مسألة صعبة جداً، خاصة لأن أحداً لا يعرف بعدُ ما الحياة فعلاً. أشك في أن أحداً خمَّن أو اكتشف تكوين الظروف الضرورية لنوع حياتنا ما لم نعرف المثال المعقد وبعيد الاحتمال للحياة الموجودة مسبقاً هنا على الأرض. ولكن على الرغم من أننا ندرك كثيراً من الأسئلة الجوهرية العميقة التي لا يزال علينا مناقشتُها، يبالغ البشر بنحو متكرر في تقدير المقدار الذي نفهمه حالياً. أحد الأسباب التي تجعلني أجد التعليل الإنساني anthropic rea مقلقا هو أن أحداً لا يعلم بعدُ ما يمكن أن يكون جوهرياً لأي شكل محتمل من أشكال الحياة، أو حتى لبنى مثل المجرات التي قد تدعمها. أنا لست واثقة كثقة الآخرين بأن هناك أي شكل من أشكال الحياة يشبه حياتنا.

ولكن قبل طرح أسئلة تتعلق بأشكال الحياة المجردة المُتخيَّلة، ربما نود أولاً أن نعلم كيف وأين بدأت الحياة على كوكبنا. هل نشأت محلياً أو جاءت من مكان آخر من الفضاء الخارجي؟ يظن البعض أن النيازك والمذنبات قد جلبت شكلاً جاهزاً من أشكال الحياة إلى الأرض من خلال الأبواغ Spores في سيناريو يدعى التبذر الشامل (البانسبيرميا) Panspermia، يجادل البعض بأن اصطداماً نيزكياً ساعد على تذليل بعض العقبات لتشكل الحياة، بينما يقترح آخرون جدلاً أن الحياة على الأرض قد تطورت من دون أي تدخل مباشر من الفضاء الخارجي. تمتاز الفرضية الأخيرة بميزة أن من بين جميع الأماكن في المجموعة الشمسية التي نعلم بها، يبدو أن الأرض تتمتع بالظروف الأنسب لظهور الحياة. على الرغم من أن بيئات مماثلة ربما وجدت في أماكن أخرى- بحسب علمنا- وحدها الأرض لديها بيئات بحرية ضحلة، مثل الأهوار والأحواض المدية، والمحاليل المائية المتجمدة، أو السطح الطيني الذي يمكن أن تتركز فيه المواد الكيميائية وتتفاعل.

من المؤكَّد أن العناصر الثقيلة التي صنعت الحياة قد جاءت من الفضاء الخارجي. كان الهيدروجين موجوداً في البداية المبكرة لتكوُّن الكون، ولكن العناصر الأخرى الأساسية- الكربون والنتروجين والأكسجين والفوسفور والكبريت- نشأت فقط بسبب التركيب النجمي الكثيف والساخن وانفجارات السوبرنوفا التي حصلت قبل ولادة شمسنا. ولقد سعدتُ بذكر تتابع هذه الأحداث في مقابلة مع طلبة كانوا يبحثون عن الكويكبات القريبة من الأرض باستخدام تلسكوب تينيريف Tenerife telescope في جزر الكناري. بعد استفساراتهم التقليدية، طرحوا السؤال الملتوي نفسه الذي طرحوه على جميع من قابلوهم: "ما الخواص التي أعتقد أنها مشتركة بين النجوم الصغيرة والتلاميذ؟". شعرتُ بالراحة عندما أُعجب الطلبة بإجابتي، والتي كانت أن التلاميذ يمتصون الأفكار ويعالجونها لخلق أفكار جديدة يمكنهم بعدها أن يرسلوها إلى العالم لإعادة بدء الدورة- مثلما تمتص النجوم المادة بين النجمية Interstellar material لتكوين عناصر ثقيلة، ثم تقذفها بعد ذلك مجدداً إلى الفضاء لتعاد معالجتها من جديد. عندما تُقذف مادة جزيئية، وتنتشر في الوسط البينجمي، وتتجمع في سحب كثيفة تعود أجزاء منها لتدخل مناطق تتشكل فيها النجوم، لا يكون نمط الانتشار مختلفاً جداً عن توليد ونشر وتطور الأفكار.

ولكن كان لا بد من معالجة العناصر الثقيلة قبل أن تنشأ الحياة. حدث هذا على الأرض عندما شكلت المواد الكيميائية مركبات عضوية مستقرة ومعقدة بنحو متزايد، وهذه الأخيرة أنتجت في النهاية الحمض النووي الريبي ذاتي الاستنساخ Self-reproducing RNA، ومن ثم الحمض النووي الريبي منزوع الأكسجين DNA، والخلايا بعد ذلك، وفي النهاية في وقت لاحق جداً- الكائنات الحية متعددة الخلايا. تتألف هذه جزئيا من الأحماض الأمينية، الحجر الأساس في البروتين. مع تقدُّمنا في فهم مزيد مما هو ضروري في تطور الأحماض النووية DNA وRNA والبنية الخلوية، قد نتمكن من تكوين فهم أفضل للظروف القصوى التي كانت جوهرية في نشوء الحياة.

أحد الأسئلة المثيرة حول نشوء الحياة هو كيف تشكلت الأحماض الأمينية في الوسط البينجمي وفي أماكن أخرى. في بداية خمسينات القرن العشرين، أجرى ستانلي ميلر Stanley Miller وهارولد أوري Harold Urey من جامعة شيكاغو تجربةً شهيرة سخنوا فيها قارورة ماء كانت موضوعة بداخل إناء يحتوي على الميثان والأمونيا والهيدروجين. كان هدفهما محاكاة المحيط البدئي Primordial ocean في الغلاف الجوي المبكر. أدى تفريغ كهربائي مطبّق في بخار الماء دورَ البرق في "غلافهما الجوي" الاصطناعي. نجح ميلر وأوري في إنتاج الأحماض الأمينية بأدواتهما البسيطة، وبيَّنا أن إنتاج الأحماض الأمينية في المجموعة الشمسية والبيئات خارج الشمسية ليس في الواقع أمرا مفاجئاً.

من المرجح أن الغلاف الجوي المبكر للأرض كان يحتوي على ثاني أكسيد الكربون والنتروجين والماء، وليس على غازي الميثان والأمونيا الأقل استقراراً والمستخدمَين في التجربة. لكن من المثير للاهتمام أن توزيع الأحماض الأمينية على اليابسة يشبه بنحو ملحوظ التوزيعَ الذي أنتجته تجربة ميلر-أوري. من المحتمل أن تكون النتيجة الأساسية المستخلصة من تجربتهما هي أن توليد المواد العضوية على الأرض هو أمر بسيط نسبياً- وكذلك في أي مكان آخر في المجرة والمجموعة الشمسية. ضع في اعتبارك أن المصطلح عضوي في الكيمياء يشير ببساطة إلى وجود الكربون، وليس بالضرورة إلى عناصر الحياة. هذا المصطلح، على الرغم من أنه يؤسَف له، لم يُستخدَم مصادفةً لأن بعض الجزيئات العضوية (وليس كلُّها) ضروري للحياة كما نعرفها.

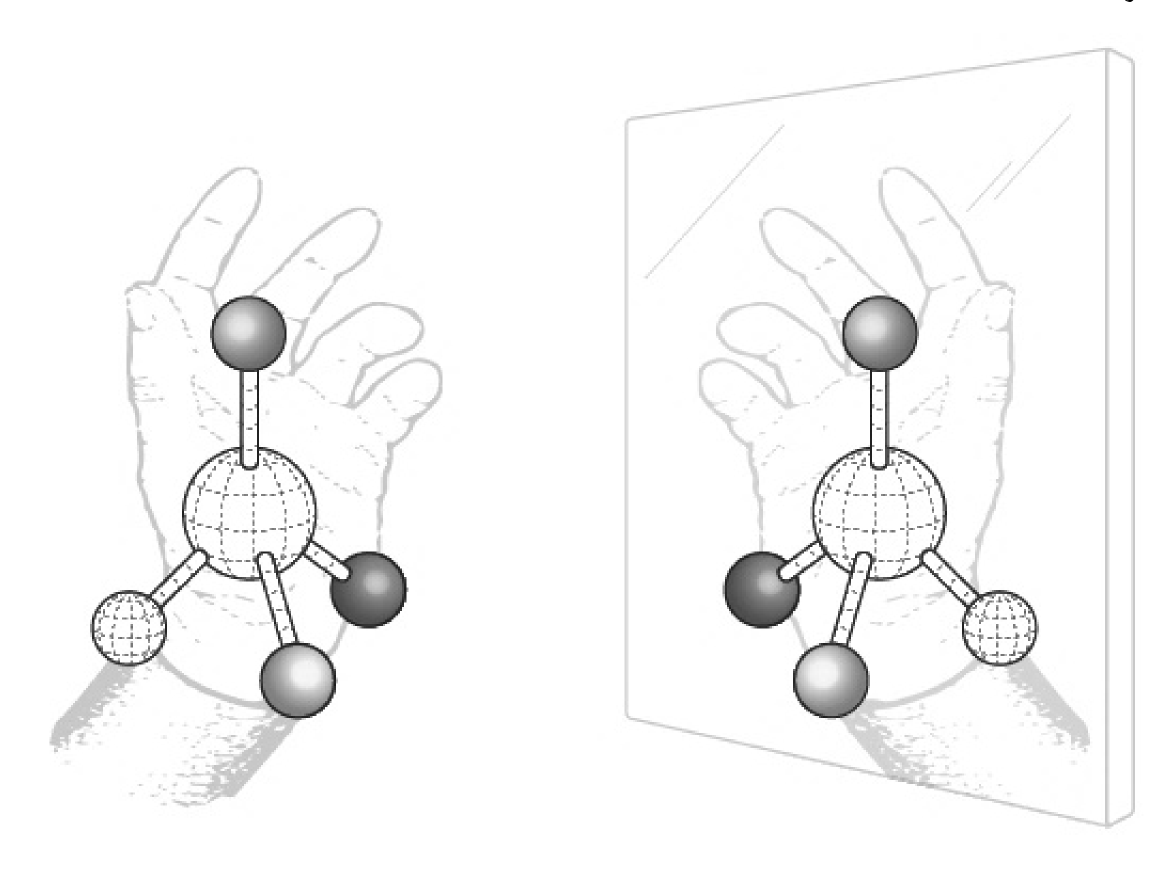
بالطبع هناك عمليات تشتمل على كربون تحدث تقريباً في كل مكان في الكون. فالتدفقات النجمية Stellar outflows والوسط البينجمي Interstellar medium والسحب الجزيئيةMolecular clouds وسدم النجوم الأولية Protostellar nebulae جميعها تحتوي على مادة عضوية. وتنتج المنطقة المحيطة بنجم مثل الشمس كمية كبيرة من المادة العضوية، كما فعلت السحابة الجزيئية الباردة الكثيفة التي نشأ فيها النجم. هذا يجعل التخليق العضوي Organic synthesis أمراً غير مفاجئ، ولكن للسبب نفسه يصعب تحديد المكونات الأساسية لأصل الحياة. ربما يكون قد نشأ بعضها في مكان آخر، ولكن بعض العلماء يعتقدون أنه من المحتمل أن كثيراً من المادة العضوية قد نشأت داخلياً- أو على الأقل نشأت من مادة أعاد وشاحُ الأرض معالجتَها قبل دخولها في الجزيئات التي ساهمت في تكون الحياة في المحصلة.

نحن نعلم أنه على الأقل بعضُ المواد العضوية قد وصلت إلى الأرض عن طريق اصطدامات الأجرام في المجموعة الشمسية. تبدو كمية المادة العضوية الموجودة داخل حزام الكويكبات أصغر من ذلك في الخارج بنحو ملحوظ، وهو أحد الأسباب التي تدفعنا إلى الاعتقاد أن جزءاً مجدياً من المادة العضوية في الأرض قد وصل من الفضاء الخارجي. السبب الآخر هو أنه على الرغم من أن البقايا المعدنية من السنوات الأولى من حياة الأرض نادرة، يدلنا عدد الفوهات الكبير في القمر والحجم الأكبر بكثير للكوكب على أن كثيراً من الاصطدامات مع الأرض قد حدثت أيضاً في السنوات الأولى. من المرجح أن هذه الاصطدامات جلبت كميات كبيرة من المادة العضوية.

بالطبع عثرنا على الأحماض الأمينية إضافةً إلى البيورينات Purines والبيريميدينات Pyrimidines- الضرورية أيضاً في تركيب الحمضين النوويين DNA وRNA- في الفضاء بالفعل. إذ تحتوي الكويكبات والمذنبات على الأحماض الأمينية، وبعضها جزءٌ من الحياة هنا، وبعضها غير موجود على كوكب الأرض. وأحد طرق تمييز

الحمض الأميني غير الحيوي non-biotic هو عدم التناظر المرآتي Chirality أو الصفة اليدوية Handedness (انظر: الشكل 31). فقط الأحماض الأمينية يسارية اليد Left-handed amino توجد في الحياة على الأرض، بينما الأحماض الأمينية من المجموعة الشمسية الخارجية تحتوي على جزيئات من اليسارية واليمينية اليد. اليدوية لها علاقة باصطفاف الذرات حول ذرة كربون، والتي لها اتجاهية Directionality مميزة – مثل الاتجاهات المختلفة التي تتخذها أصابعك في يديك اليمنى واليسرى. لكن، وَجدت دراسة واحدة على الأقل فيضاً من الجزيئات اليسارية في نوع واحد من الأحماض الأمينية في رسوبيات متبقية من كويكب، مما عكَّر ارتباط الأحماض الأمينية اليسارية بالحياة.

جاء كثير مما نعرفه عن الأحماض الأمينية في الكويكبات من النيزك مورشيسون Murchison meteorite، الذي سقط في العام 1969 على مدينة أسترالية بالقرب من ملبورن. كان نيزك مورشيسون قطعة من كويكب نشأ بين المريخ والمشتري. وكان من نوع الكوندريت الكربوني Carbonaceous chondrite، الذي يحتوي- كما ستدرك من الاسم- على كمية وفيرة من الجزيئات العضوية، بما فيها الأحماض الأمينية. بمحض المصادفة، هناك بالفعل مختبرات قادرة على دراسة النيازك أُنشئت في الأصل من أجل دراسة العينات القمرية من مهمات أبولو. لذا من حسن الحظ أن العلماء كانوا يمتلكون الأدوات للمقارنة بين نيزك مورشيسون مع أخرى مشابهة، مثل نيزك موري Murray meteorite الذي عُثر عليه في أوكلاهوما، ونيزك أورغويل Orgueil في فرنسا.



[الشكل 31] جزيئات غير متناظرة مرآتيا بيدوية لا تبدو متماثلةً عندما تنعكس في مرآة. الأحماض الأمينية في الكائنات الحية يمينية اليد.

يحاول العلماء التجريبيون أيضاً محاكاة الظروف الكونية هنا على الأرض بهدف دراسة مصير الأحماض الأمينية التي وصلت من الفضاء. وقد أظهرت أبحاثهم أن الأحماض الأمينية يمكنها أن تنجو من اصطدام المذنبات، أو يمكنها أن تنشأ عندما تضرب الأرضَ مادةٌ من الفضاء الخارجي. بينت الملاحظات الرصدية التي

تدرس انبعاث غازات المذنبات أنه بينما تمتلك معظم الكويكبات مادة بينجمية عالية المعالجة، تحتوي بعض الكويكبات الجليدية على مادة بينجمية بكر مبكرة. يجب أن تساعد دراسة النيازك والغبار بين الكواكب، الذي يعكس محتوى المذنبات التي جلبت المواد إلى الأرض، على إثبات أصل وكمية بعض الجزيئات التي جاءت من الفضاء.

لعل الماء، كالكربون، أساسي للحياة في المجموعة الشمسية – إذا وأينما وُجد. إحدى سمات الأرض البارزة على الخصوص هي أن نحو ثُلُثي سطحها مغطى بالمحيطات– ليس بكاملها أو لا تخلو تماماً منها. ربما كانت هذه التغطية الجزئية للمحيطات هي التي سمحت بوجود الشريط الساحلي والمناطق المدية المهمة للحياة التي تطورت هنا أيضاً.

الماء بالتأكيد أساسي للحياة كما نعرفها. تشير الأدلة في الصخور إلى أن الماء السائل قد وُجد بحالة مستقرة على سطح الأرض خلال معظم تاريخها. وتبدو الصخور التي يعود عمرها إلى 3.8 بليون سنة أنها تشكلت في ظل وجود الماء على سطح الأرض. والزيركون الذي يعود بتاريخه إلى أقدم من ذلك بنحو 4.3 بليون سنة على الأقل– قد وجد في شكل يبدو أنه احتاج إلى الماء في القشرة الأرضية المبكرة.

من المؤكد أن الحياة على الأرض ممتنة لأي ما كان قد جلب لنا هذه الكميات الهائلة من الماء التي يمتلكها الكوكب حالياً. مع ذلك، كما اعترف صديق لي بعد جولة ساحرة بالعبّارة أخيراً، يبقى مصدر هذا المورد المهم المحيط بنا لغزاً. ربما انبثق جزء من مياه المحيطات من الماء المحبوس في الصخور تحت السطح، ولكن الكمية القليلة التي لا بد أنها تراكمت ليست كافية بالضرورة لتفسر كميات الماء الكبيرة الموجودة.

سبق أن رأينا أن الاصطدامات قد تؤدي دوراً في إيصال المادة العضوية التي ساعدت على تسهيل عملية توليد الحياة. كذلك ربما كان وصول الماء من الفضاء الخارجي عن طريق المذنبات أو الكويكبات في زمن مبكر احتمالاً ممكناً أيضاً– غالباً في أثناء القصف الثقيل المتأخر (الكارثة القمرية) Late Heavy Bombardment- إنه أمر محيِّر، لأن معظم الماء الذي يصل إلى الأرض عن طريق النيازك يكون محبوساً في شبكة من المعادن، لذا فلا بد من عملية ما لتفصله عن مضيفه من السليكات غالباً– على الرغم من أن بعض الجليد الخلالي Interstitial ice قد يصل إلى الأرض عن طريق الكويكبات أيضاً.

بدت المذنبات في البداية المرشحَ المحتملَ لأصل الماء، لأنها تتألف من الجليد في أغلبها. ولكن نظائر الكربون والهيدروجين والأكسجين على الأرض لا يبدو أنها تتطابق مع ما رُصد حتى الآن في المذنبات، مما يشير إلى أن المذنبات قد لا تكون المصدر الرئيس للمواد المتطايرة Volatiles على الأرض. تعزّزت هذه النتيجة في العام 2014 عندما أشارت نتائج مسبار روزيتا Rosetta إلى أن تركيب نظائر الهيدروجين في المذنب الذي درسه لم يتطابق مع نظائره على الأرض– ما يجعل فرضية أن معظم الماء جاء من المذنبات أقل احتمالاً أيضاً. إذا كان لأجرام الفضاء دور، فإن مساهمات الكويكبات الأبعد -ذات معدلات النظائر المشابهة لتلك التي على الأرض- كانت مهمة جداً.

أمر آخر يتعلق بالماء في الأرض المبكرة هو أن إنتاج طاقة الشمس الشابة ربما كان نحو 70% مما هو عليه اليوم. مع سطوع Luminosity الشمس الأقل في البداية، حتى الماء الذي تشكل فعلاً لن يكون بحالته السائلة من دون بعض التفسير– مأزق يُعرَف بمصطلح "مفارقة الشمس الباهتة" The Faint Sun Paradox. لكن الأرض الشابة ولَّدت حرارة من خلال إطلاق طاقة جاذبية في أثناء انهيارها بعضها على بعض، ومن خلال النشاط البركاني، والصدمات من النيازك الآتية عبر الغلاف الجوي، والتسخين المدي Tidal heating بفعل القمر الذي كان أقرب في ذلك الزمن، ومن خلال إشعاع تحلل نظائر غير مستقرة داخل الأرض. أي من هذه الأشياء قد يجعل الأرض أكثر دفئاً من الإشعاع الشمسي وحده. في الغالب، أدت غازات الدفيئة، التي تساعد على تدفئة الكوكب اليوم، الدور الأهم في ذلك الزمن أيضاً. غازات الدفيئة مثل ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي تؤدي إلى امتصاص الجو بعضاً من ضوء الشمس -الذي يضرب الأرض بأطوال موجية مرئية- ومن ثم تبعثها من جديد كأشعة تحت حمراء. سواء كانت غازات الدفيئة هي المسؤولة بنحو كامل عن حرارة الأرض الأعلى من

المتوقعة في بدايتها أو لا، كانت المحيطات السائلة موجودة بوضوح على الأرض المبكرة. لذا لا بد أن واحداً أو أكثر من الحلول أعلاه قد أدت دوراً.

النطاق الصالح للحياة

تحتوي بيئتنا الكونية على أصدقاء وأعداء- من داخل المجموعة الشمسية وخارجِها. يبدو أن الحياة تعتمد على خليط من الظروف الفيزيائية التي يمكن أن يزدهر فيها النظام الإيكولوجي الملائم- متطلبة بعض الظروف الاستثنائية التي تسمح لها بأن تستفيد من المزايا المفيدة، وأن تزيح أو تكبت الظروف غير المواتية. سيتبين في الغالب أن فهم ضروريات الحياة مخيف بقدر فهم أصل الحياة. ولكن العلماء مع ذلك يأملون تحديدَ ما هو أساسي لبيئة قابلة للحياة- لكل من الحياة المجهرية البسيطة والحياة المعقدة المتقدمة التي من المفروض أنها تتطلب ظروفاً أكثر خصوصية. على الرغم من أن أحداً لا يعرف جميع الأجوبة بعد، فإن أي شيء يجعل بيئتنا بيئةً خاصة يستحق بعض الاهتمام.

ربما تجدُر الإشارة إلى أن الشمس بحد ذاتها تبدو مميزة في بعض النواحي. الشمس هي واحدة من النجوم العملاقة- من بين العشرة في المئة العليا- وقد تحتوي على معادن أعلى من الظروف النمطية، وهي قريبة من نصف المستوى المجري بقدر غير عادي بالنسبة إلى عمرها. وإضافة إلى ذلك يبدو أن لها مدارا أكثر استدارة من أغلب النجوم المعمَّرة المماثلة، وهي تتموضع بحيث تدور بمعدل يماثل تقريباً دوران الأذرع الحلزونية ومن ثم تجتازها بمعدل غير متواتر نسبياً. نحن لا نعلم مدى جوهرية هذه الخواص غير النمطية للشمس، ولكن أي خاصية غريبة قد تكون محط اهتمام.

البناء الضوئي Photosynthesis، الذي يعتمد على الأشعة الشمسية، أساسي لمعظم الحياة على الأرض. ومن شبه المؤكد أن الطاقة ضرورية لأي نوع من أنواع الحياة، لأنها تتغذى على العمليات التي قد تُنشئُها وتحافظ عليها بالنهاية. على الأرض، من دون شك، تبقى الشمس هي المصدر الرئيس للطاقة. إن الطاقة من الشمس اليوم أعظم بآلاف المرات من المصدر الأهم الثاني، أي حرارة جوف الأرض. كما تتضمن المساهمات الأقل أهمية اليوم بما في ذلك البرق- بطاقة أقل بما يعادل مليون ضعف- والأشعة الكونية- بطاقة أقل بمعامل أقل بما يعادل ألف ضعف.

على الرغم من أن أهميته لكل أشكال الحياة لا تزال موضوع تخمين، فإن الماء السائل مهم بالتأكيد للحياة الموجودة على الأرض. إضافةً إلى معرفة من أين جاء الماء، نود أن نعرف أيضاً أين ستكون حالته السائلة مستقرة. لا تتطلب معالجة هذا السؤال معرفتنا عن الشمس وعن بُعدنا عنها فحسب، بل يتطلب فهم تأثير الإشعاع، ومصادر الحرارة المحتملة الأخرى، ومقدار الضغط في الغلاف الجوي.

بالاستناد فقط إلى عاكسية Reflectivity الأرض وإلى سطوع الشمس وبُعدها عنا، كان الماء على سطح الأرض سيبقى متجمداً حتى اليوم لولا تأثير التدفئة بفعل الغلاف الجوي. على الرغم من أننا نقلق بنحو مبرَّر حيال الحرارة الزائدة في الغلاف الجوي اليوم، ستكون الأرض باردة جداً لولا تأثير الدفيئة، من ثاني أكسيد الكربون والميثان وبخار الماء وأكسيد النتروجين، التي تُبقيها أكثر دفئاً. يوجد الماء السائل حالياً على الأرض فقط بسبب غازات الدفيئة هذه، التي تمتص الأشعة تحت الحمراء وتُدفئ الكوكب، ومن ثم تحقق التوازن.

النطاق الصالح للحياة Habitable zone هو منطقة تتوافر فيها الظروف التي تساعد الحياة على البقاء. إنها المنطقة "المعتدلة" [غولدي لوكس كما في القصة الخيالية] Goldilocks المناسبة تماماً لتوافر ماء سائل مستقر. البعد الشديد عن مصدر الحرارة الرئيس- الشمس- سيجعل الماء جليداً. والقرب الشديد لن يدع الماء يتكثف على سطح الأرض في المقام الأول. قد يوجد الماء تحت سطح الكوكب أيضاً، على الرغم من أن ذلك من غير المحتمل أن يستضيف تنوع الحياة الذي تقدمه المحيطات الكبيرة.

تُعرِّف الحدود الخارجية النطاق الصالح للحياة فيما يخص الماء أحياناً بأنها البعد عن الشمس الذي يبدأ فيه ثاني أكسيد الكربون التكثفَ خارج الغلاف الجوي، مما ينتج منطقة تمتد إلى ما وراء الأرض بنحو ثُلث مسافة بُعد الأرض عن الشمس. وتُعرَّف أحياناً بأنها المنطقة التي يبقى فيها ما يكفي من الماء وثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ليمنع الماء من التجمد. لنضع هذا ضمن منظور قابل للتصور، يقع كوكب الزهرة ضمن الفئتين، ولكن المريخ يقع ضمن الفئة الثانية، أما الكواكب الخارجية Outer planets، لكونها بعيدة جداً، فلا تقع ضِمن أي من الفئتين.

حتى من دون معرفة كيف نشأ، نحن نعلم أن الماء كان موجودا على الكوكب تقريباً منذ بداية الكوكب. مع ذلك تغيَّر سطوع الشمس – إذ ازداد زيادة كبيرة منذ بداية تشكلها– وتغيَّر الغلاف الجوي أيضاً. لذلك أصبحت هناك منطقة محدودة أكثر تُعرف بـ "النطاق الصالح للحياة بشكل مستمر" Continuously habitable zone، وهي المنطقة التي يمكنها أن تدعم وجود الماء السائل على مدى عمر الكوكب. وفقاً لنمذجات المناخ الحالية، النطاق الصالح للحياة باستمرار هو منطقة مقيدة أكثر تقع ضمن نطاق 15% من المسافة بين الشمس والأرض. طبعاً هذا محدد باليوم الحالي. لكن خلال أربعة بلايين سنة أخرى، ستتحول الشمس إلى عملاق أحمر Red giant، وبعد عدة بلايين سنة أخرى، ستنطفئ تماما. وفقاً للنمذجات الحالية، ما من شكل من أشكال الحياة المرتبطة بالأرض– بسيطة أو معقدة– سيبقى على قيد الحياة في هذا المستقبل البعيد.

لكن، قبل أن نقلق حيال ذلك المصير البعيد والكئيب، تعترضنا أمور أكثر إلحاحاً. أحد الأمور المهمة هو استقرار حرارة الأرض، وما يعنيه هذا الاستقرار للحياة كما نعرفها. في مجتمعنا الحالي، يمكن أن يؤدي الاختلاف الضئيل نسبياً في الحرارة إلى تأثيرات كبيرة في السواحل، والزراعة، وقابلية سكن الإنسان. ولكن من أجل فهم تطور الحياة، تتدخل الاعتبارات العامة للحرارة. الكربون أساسي على الأرض، ولا بد للكربون في الغلاف الجوي أن يعاد تخزينه بنحو مستمر.

على الكواكب الأخرى، قد تكون سحب الميثان وثاني أكسيد الكربون ذات علاقة أيضاً. ولكن على هذا الكوكب، العمليات التي تنظم الكربون في الغلاف الجوي حساسة. يُزال الكربون من الغلاف الجوي عندما يتحلل في ماء المطر أو عندما يُمتَص في عملية البناء الضوئي في النباتات، ويعاد تخزينه عندما يُعاد تدويره من جديد إلى الغلاف الجوي عن طريق الصفائح التكتونية وتجوية الصخور المستمرة. يعود الكربون عندما يُفقد قاع المحيط المُتشكل في منتصف المحيط لاحقاً تحت نطاق الاندساس Subduction zones حيث تتفاعل العناصر لتنتج ثاني أكسيد الكربون الذي يهرب من خلال البراكين والينابيع الحارة وفتحات أخرى. كما يعود تخزين الكربون ببطء أيضاً من خلال نهوض وتكون الجبال، ويُعاد تدويره بسرعة من خلال حرق الوقود الأحفوري. تؤثر جميع هذه العمليات في مخزون الكربون في الغلاف الجوي، والذي هو بدوره مهم جداً في تنظيم حرارة الأرض.

قد يكون الاستقرار المناخي طويلُ الأمد مُحفزاً ضرورياً آخر لتطور الحياة. على الأرض، لم يعتمد هذا الاستقرار على المحيطات ومصادر الحرارة الداخلية لتوجيه الصفائح التكتونية التي خلقت طبقة الدفيئة فحسب، بل على التطور النجمي أيضاً، بمعدل اصطدام نيازك ومذنبات منخفض، وعلى وجود القمر، الذي يوازن محور دوران الأرض. لعل هذه الظروف كانت الأكثر أهمية للحياة التي تشكلت في الخمسمئة مليون سنة الماضية. بنباتاتها وحيواناتها الكبيرة، على الرغم من أن بعض الاستقرار المناخي ربما كان مهماً أيضاً للحياة المجهرية المبكرة في الثلاثة ملايين سنة الأولى.

ربما كان الغلاف الجوي المستقر مهماً في ظهور الحياة. فلو أن كثيراً من الأشعة الكونية ضربت الكوكب– أو كثيراً من الكويكبات أو المذنبات في هذا الخصوص– لما سنحت الفرصة لكثير من أشكال الحياة للتشكل. وقد يتدمر سريعاً أيُّ شيء يتمكَّن من النشوء بنجاح. فالكوكب الذي يستضيف الحياة يجب أن يكون بعيداً بما يكفي عن الشمس ليتجنب الإشعاع الشمسي الزائد، ولكن ربما يجب أن يكون قريباً بما يكفي ليكون

محمياً بالكواكب الخارجية من الكويكبات. سواء كان هذا ضرورياً أو لا، من المؤكد أن المشتري يؤدي دور الأخ – أو الحارس– الأكبر للأرض الذي يحمي "شقيقه" من الهجمات الخارجية، ويجعل تطور الحياة أبسط.

كما تحمي الكوكبَ الرياحُ النجمية Stellar wind – المذكورة في الفصل الثامن في سياق تعريف حدود المجموعة الشمسية – التي تتفاعل مع المادة البينجمية لتنشئ الغلاف الشمسي Heliosphere. يكون معدل الأشعة الكونية المجرية منخفضاً نسبياً في هذه المنطقة، ومن الممكن أن يكون له دور في توازن مناخ الأرض، مما يحمي أي حياة ناشئة من تأثيرها المباشرة المدمر.

ومن المدهش أننا نعيش حالياً في منطقةٍ – 300 سنة ضوئية عرضاً– تُدعى الفقاعة المحلية Local Bubble، وهي مجال يشبه الفراغ Vacum بكثافة هيدروجينية منخفضة جداً ضمن الوسط البينجمي في ذراع الجبار Orion Arm من درب التبانة Milky Way. حديثاً فقط– ربما في بضعة ملايين السنوات الماضية– دخلنا هذه المنطقة الدافئة، ومنخفضة الكثافة، والمؤينة جزئياً، ببيئتها البينجمية قليلة الكثافة نسبياً. خلال هذا الزمن كانت المنطقة المحاطة بحدود الغلاف الشمسي– حيث تسيطر الرياح الشمسية على الوسط البينجمي– كبيرةً بقدر استثنائي. نحن لا نعلم ما إذا كان الأمر مجرد مصادفة: أن الظهور الإنساني على الأرض تصادف مع الفترة الزمنية التي أحاط تجويف الفقاعة المحلية فيها الأرض، أو أن هذا الانخفاض الشاذ في كثافة الغاز وكثافة الأشعة الكونية كان جوهرياً في تشكُّل الحياة المعقدة.

النيازك وتطور الحياة

من المؤكَّد أن النيزك الذي شكل فوهة شيكشولوب قد أدى دوراً في مجرى تطور الحياة اللاحقة، وذلك بإبادة معظم الأنواع الموجودة وتمهيد الطريق لأنواع أخرى. على الرغم من أن الأرقام غير دقيقة تماماً، يبدو أن معظم النيازك العملاقة تعود بتاريخها إلى وقت قريب، أو يتصادف مع انقراض جماعي. تُقدم طبقات الإيريديوم والميكرتكتيت والكوارتز المصدوم بالقرب من حدود الانقراض دعماً للدور المحتمل الذي أدته الاصطدامات النيزكية التي تستحق مزيداً من الدراسة، وكذلك الفوهات الفعلية التي يبدو أنها تزامنت مع بعض أحداث بارزة غيرت الحياة.

مع ذلك، معظم الاقتراحات التالية تخمينية. على الرغم من موجة الاقتراحات المتحمسة السابقة لألفاريز حول محفزات النيازك، حتماً ليست الكويكبات والمذنبات هي التفسير الكامل لدمار– أو لأصل– الحياة على الكوكب. حدثُ الانقراض K-Pg هو الانقراض بالاصطدام الوحيد المبرهن. لعل الدليل على التغير المناخي والثورانات البركانية التي أدت دوراً في حوادث الانقراض في نهاية العصر الكامبري المبكر، ونهاية العصر البرمي End-Permian، ونهاية العصر الترياسي End-Triassic، ومنتصف العصر الميوسيني Mid-Miocene أكثر إقناعاً من بعض الاقتراحات القائلة بالانقراض بفعل الاصطدامات. لذا لا تبالغْ في الحماسة للتخمينات التي سأعرضها الآن. فالأدلة تشير إلى نظام مترابط. ونظراً إلى أن بعض الاصطدامات الضخمة حدثت في أوقات تقارب عمر الأرض، وأصل الحياة، وبداية الحضارة، فمن الجدير بالاهتمام دراسةُ أي ارتباط محتمل قدر ما يمكننا– حتى إن لم يكن الدليل قاطعاً.

من بين حوادث الانقراض الرئيسة الخمسة، انقراض نهاية الديفوني End-Devonian – الذي حدث بين 360 و400 مليون سنة مضت– وهو الثاني بعد الانقراض K-Pg من حيث الأدلة على سبب من الفضاء الخارجي. من المحتمل حدوث عدة اصطدامات في ذلك الوقت، في الغالب بفعل كويكب تشظى أو بسبب اضطراب حفز اصطدامات مذنبية متعددة من النوع الذي سنتناوله قريباً. على الرغم من أن أدوات قياس التوقيت الدقيقة لا تدعم بالضرورة دوراً رئيساً للنيازك في حادثة الانقراض هذه– وخسارة الأنواع في هذا الإطار الزمني يبدو أنها نتيجة انتواع Limited speciation محدود أكثر من أن يكون بسبب انقراض– من المثير

للاهتمام أنه في العام 1970، قبل اقتراح ألفاريز بشأن الانقراض K-Pg بفترة طويلة، اقترح عالم الأحافير ديغبي مكلارين Digby McLaren أن اصطداماً نيزكياً قد يكون المسؤول عن حدث الانقراض السابق هذا.

معظم الاقتراحات الأخرى للترابط بين الاصطدامات والانقراضات تهتم بأحداث ثانوية، مثل الانقراض الإقليمي في أمريكا الشمالية قبل 74 مليون سنة. فكثير من أنواع التماسيح، وبعض الزواحف المائية، وبعض الثدييات، وعدة أنواع من الديناصورات انقرضت في ذلك الزمن، الذي بدا أنه يتصادف مع نشوء بنية اصطدام مانسون Manson impact structure في إيوا. تزامن توقيت حوادث العصر الإيوسيني المتأخر قبل نحو 35 مليون سنة، الذي تألف من انقراضات متعددة في البحر وبعض الزواحف والبرمائيات والثدييات على اليابسة، تصادفت تقريباً مع اصطدامات أيضاً. تضم الأدلة بقايا الفوهة الصدمية في بوبيغاي Popigai في روسيا، وبقايا فوهة اكتُشفت أخيراً بعرض 90 كم في خليج تيشزابيك باي Chesapeake Bay بالقرب من واشنطن العاصمة، وواحدة أخرى أصغر منها في أتلانتك سيتي بنيو جيرسي. اكتُشف معلم العاصمة واشنطن بذكاء من خلال التعرف على حقول صخرية Boulder field بترسبات ناتجة من تسونامي ناجم عن اصطدام، وهو الذي أعقبته دراسة التنميط الزلزالي Seismic profiling ودراسة عينات الحفر Drilling cores. تدل المستويات الأعلى من الطبيعية من الإيريديوم والغبار بين الكواكبي ّInterplanetary dust من هذا الوقت أن الهطْل المذنبي Comet shower قد يكون المسؤول عن هذه الاصطدامات المتعددة.

يعرض حدث العصر الإيوسيني المتأخر دليلاً على تدخل من الفضاء الخارجي بالاعتماد على منهج مختلف– دليل جيوكيميائي– يمكن أي يساعد في النهاية على إكمال شح سجل الاصطدامات المثير للإحباط. أظهر كين فارلي Ken Farley من معهد كاليفورنيا للعلوم وزملاؤه كيف نتعلم عن الاصطدامات من نظائر الهيليوم التي تتبع الغبار البين كوكبي، وهو مادة قد تزداد كثافتها في أثناء الهطْل المذنبي. أظهرت نتائجهم المثيرة للاهتمام ارتفاعاً في الهيليوم3- بين نحو مليون سنة قبل الاصطدامات التي خلّفت فوهات وبيغاي وخليج تيشيزابيك باي قبل 36 مليون سنة ومليون ونصف سنة بعدها. يقدم الغبار دليلاً قوياً على هطْل مذنبي، ربما أثاره اضطراب مفاجئ في سحابة أوورت Oort cloud، التي سنعود إلى موضوعها في الفصول المقبلة من الكتاب.

لإكمال قائمة اقتراحات الاصطدامات التخمينية، يبدو أن انقراضاً جماعياً ثانوياً في العصر الميوسيني المتأخر قبل نحو عشرة ملايين سنة يتصادف مع شذوذ في الإيريديوم والكريات البلورية Glass spherules. بنحو مثير للاهتمام، وجد فارلي أيضاً زيادة في هيليوم-3 في هذا الوقت. كان توقيت والتطور المؤقت للغبار في هذه الحالة أكثر توافقاً مع تعليل الكويكبات– الاصطدام المعروف الذي أنتج عائلة كويكبات فيريتاس Veritas asteroid على وجه التحديد.

إن دور الاصطدامات في نشوء الحياة أقل وضوحاً من دورها في تدمير الحياة. ولكن البعض يرحب بإمكانية أن الاصطدامات قد أدت دوراً في هذه العملية أيضاً. حتى إنني سأذكر الإمكانية الخيالية التي تقترح أن بعض الأحداث المثيرة في الإنجيل وعلم اللاهوت، أو حتى أشكال بُنى مما قبل التاريخ لا يمكن تفسيرها مثل ستونهينج Stonehenge، قد تكون أثارتها أحداث غامضة أو مبهمة من منشأ فضائي محرض بالنيازك. بالعودة أكثر إلى العلم، يقترح الباحثون أن أحداث الاصطدام الأولى قد تكون نسفت جزءاً من الغلاف الجوي وحتى المحيطات، مما أخر أو قيَّد تطور الحياة على الأرض. ولكن ربما أوجدت هذه الأحداث ظروفاً بيئية أدت إلى نشوء الحياة– من خلال توليد نظام حراري مائي دعم التفاعلات الكيميائية قبل الأحيائية، على سبيل المثال.

يشير تشارلز فرانكل Charles Frankel في كتاب انقراض الديناصورات The Extinction of the Dinosaurs إلى تزامن بداية التعقيد Complexity في زمن ما قبل الكامبري قبل نحو بليونَي سنة وفوهتين صدميتين ضخمتين معروفتين من ذلك الوقت. وإن لم يكن ذلك مقنعاً جداً– ربما كان دور الأكسجين رئيساً أكثر– غيرَ أن فكرته عن التوقيت مثيرة للاهتمام. هناك احتمال بعيد آخر هو أن الاصطدامات قد أدت دوراً في الانفجار الكامبري Cambrian explosion المتأخر (كلمة انفجار هنا تشير إلى ارتفاع التنوع في الحياة)، قبل

550 مليون سنة– افتراضياً بإزالة كثير من الأنواع الموجودة لإتاحة المجال لأنواع جديدة. حتى من دون آلية معروفة لإيجاد علاقة ترتبط بالحياة، يمكن العثور على أدلة على الاصطدامات في أستراليا وأماكن أخرى. تحيط ببحيرة فوهة آكرامان Lake Acraman Crater في أستراليا، بقطر يفوق 100 كم، طبقةُ مقذوفات تحتوي على الإيريديوم والكوارتز المصدوم، وهي تمتد حتى 300 كم شرقاً وصولاً إلى طبقة الأحافير الإيدياكارية Ediacaran fossils، التي سبق تشكُّلها الانفجارَ الكامبري مباشرة. يأتي دليل آخر من خانق يانز Yangtze Gorge في جنوب غرب الصين. بنحوٍ مثير للاهتمام، مباشرة فوق طبقة الحدّ مع دليل كيميائي عن الاصطدام، تظهر أحافير ثلاثية الفصوص Trilobite، مما يشير إلى بدء تشكُّل الحياة المعقدة في المحيط مباشرة بعد الحادثة- مهما كانت تلك الحادثة- التي رسبت العناصر الأكثر غرابة.

يتعلق تنبؤ آخر بالأحجار النيزكية المتأحفرة والمواد المصدومة، والمشاهدات الرصدية من الفوهات التي تدعم بقوة مجموعة من الاصطدامات في العصر الأوردوفيشي Ordovician، ومعدل ذروة في منتصف العصر الأوردوفيشي، قبل نحو 472 مليون سنة– يتزامن تماماً مع تبرعم الانتواع في الحياة المائية على وجه الخصوص. إن فكرة الأحجار النيزكية المتأحفرة مثيرة للاهتمام، لذلك أذكر هذا الاكتشاف هنا، حتى إن كان التزامن مع تنوع الحياة تخمينياً أكثر من أن يؤخَذ على محمل الجد. جاء الدليل الأول عن الاصطدامات في هذا الزمن من الجلمود المنعزل الذي وُجد في العام 1952 في الصخور الرسوبية في السويد، حيث لم ينتمِ إلى هناك بوضوح. ولكن استغرق الأمر 25 سنة لإدراك أنه نيزك متأحفر– نيزك استُبدلت كل المواد الفعلية فيه باستثناء الكروم، وهو نوع من أنواع الصخور المقاوم للتجوية مقاومة شديدة. منذ ذلك الحين عُثِر على نحو مئة نيزك في الجوار، بكمية إجمالية من المواد تشير إلى تحطم جرم بعرض 100 - 150 كم قبل نصف بليون سنة– ما أدى إلى غبار وجزيئات غبار نيزكي ظل يتساقط على الأرض بمعدل متزايد ملايين السنين. قد تشكل القطع حزاماً نيزكياً يمكن أن يستمر في إمطار الأجرام ببطء حتى اليوم.

بعض الاقتراحات أعلاه حول دور النيازك في تدمير الحياة أو توليدها هي اقتراحات ذات ميزة جدلية. ولكني سأختم هذا القِسم بدور مثبت ومبرهن للنيازك، والذي هو نبع مهم للموارد على الكوكب. بنحوٍ مثير كانت المواد التي جلبتها النيازك ضرورية للمجتمعات حتى قبل العصر الحديدي– استخدم البشر الأوائل الحديد النيزكي لصنع الأدوات والأسلحة والمصنوعات الثقافية.

هذه الطبقات الرسوبية مهمة بقدر كبير في الحقبة المعاصرة أيضاً. كثير من الذهب والتنغستين والنيكل والعناصر الثمينة الأخرى داخل القشرة الأرضية يمكننا الوصول إليها بسبب العناصر الآتية من الفضاء الخارجي التي أمطرت الأرض. حتى إن كانت الكواكب والكويكبات مصنوعة من المواد نفسها، سحبت الجاذبية الأرضية العناصر الأثقل إلى لبها ومعظمها لن يتدفق من جديد إلى سطحها. وأُعيد تزويد الأرض هذه المواد بنحو رئيس من أجرام تنهمر من الفضاء الخارجي. ربما أدى ربع الاصطدامات النيزكية إلى رواسب مربحة– نصفها على الأقل قد استُخرج. لذا، حتى إن كانت الاصطدامات النيزكية على الأرض فعالة بالضرورة في توليد الحياة، من دون شك أن الأجرام الفضائية التي اصطدمت بالكوكب قد ساعدت على تمهيد الطريق للحياة.

ما يزرعه المرء يحصده

في بداية القرن العشرين، صرح الفيزيائي اللورد روثرفورد، المشهور باكتشافه البارز للنواة الذرية، قائلاً، "كل العلوم هي إما فيزياء وإما جمع طوابع". على الرغم من كونه تصريح متعجرف وصبياني بغيض، إلا أنه يحتوي على بذرة من الصحة. العلم ليس فقط بإحصاء الظواهر، مهما كانت جميلة وملفتة. إنه يتعلق بمحاولة فهمها. يستطيع العلماء أن يجمعوا الحقائق باستخدام طرق متطورة مستمرة وملفتة، كما يفعل علماء البيولوجيا اليوم، على سبيل المثال، عندما يستخدمون تسلسل الحمض النووي وتقنيات أخرى لتسهيل عملية جمع البيانات بسرعة. ولكن المعلومات تصبح علماً صحيحاً فقط عندما يتم فهم البيانات بشكل أفضل– بشكل مثالي من خلال نظرية شاملة يمكن من خلالها اختبار الفرضيات وتقديم التخمينات.

قمنا الآن بدراسة ما هو موجود في النظام الشمسي، وما ضرب الأرض، وما هو معروف عن الانقراضات من أرشيف المستحاثات. تعرضت الكثير من المسائل العلمية لاستخلاص، وفهم، وتفسير كل هذه البيانات. ولكن تبقى هناك أسئلة هامة، مثل "أي الظواهر مترابطة ببعضها؟" و "إن كان ذلك، فكيف؟"

أحد أهم الارتباطات الفيزيائية الفلكية المقترحة الملفتة ولكن التخمينية إلى حد بعيد هي أن الأجرام من الفضاء الخارجي ضربت الأرض بتواتر مستمر، ما أثمر عن اصطدامات دورية كان يفصل بينها فترة زمنية تتراوح بين نحو 30 و35 مليون سنة. إن كان الأمر صحيحاً، سيكون التواتر دليلاً مهماً جداً لمعرفة ما الذي حفز انحراف المسارات الذي يحول الأجرام التي تدور بأمان إلى صواريخ خطرة محتملة تتجه مسرعة نحو الأرض. توجد العديد من النظريات المقترحة عن الاضطرابات، ولكن القليل منها فقط يمكن أن يطرح التواتر الذي يمكن أن يكون له فرصة في مواجهة سجل الحفر الموجود.

سأحاول باختصار أن أنصف وجهة نظر روثرفورد بتقييم ما إذا كانت الأحداث النيزكية (من سوء الحظ أن اللفظ الألطف "Meteorological" سطت عليه الأرصاد الجوية) تعرض نمطاً تواترياً يستحق التفسير العلمي. ولكن سأشير أولاً إلى ارتباط ليس له علاقة ولكنه مثبت بشكل أفضل: وهو بين الحركة الدورية للأرض، التي تحدث في قياسات زمنية أقصر بكثير من تلك التي سأتطرق إليها قريباً. وقد سميت باسم الفلكي والجيوفيزيائي الصربي ميلوتين ميلانكوفيتش، الذي طور أفكاره بينما كان سجيناً أثناء الحرب العالمية الأولى.

درس ميلانكوفيتش تأثير المناخ على لا مركزية الأرض، ميلانها المحوري، والمبادرة. بالاستناد إلى هذه الأفكار، برهن هو وعلماء لاحقون وجود تواتر تقريبي كل 20,000 و 100,000 سنة في نمط الحرارة، والذي وجدوه معكوساً في العصور الجليدية على الكوكب. عند زيارة زومايا في الباسك في إسبانيا، أشار دليلي إلى بنية الصخور ذات الطبقات الواضحة جداً. هذه الطبقات هي نتيجة اختلافات الحرارة نفسها، التي تؤدي إلى تغير معدلات الترسب بشكل دوري على مر الوقت.

مع ذلك إن دورة ميلانكوفيتش، البحث عن تواتر الحفر– الذي يعكس مقياساً زمنياً أكبر- هو بالضرورة مشروع جريء ولا أريد أن أروج له بشكل مبالغ به. إن الأدلة الحالية عن أحداث حصلت على الأرض قبل ملايين السنين شحيحة ويعتريها الكثير من الشكوك، مثل التوقيت الدقيق الذي حصلت فيه. في حالات قليلة جداً فقط، تترك هذه الأحداث السحيقة معلومات على الإطلاق وحتى أنها نادراً ما تخلف وراءها دليلاً للوصول إلى فهم مفصل. مع ذلك طالما أن الفرضيات مترابطة مع البيانات الموجودة ولديها الإمكانية في إعلامنا شيئاً عن العالم من حولنا، يستطيع العلماء أن يستكشفوها بطريقة مجدية. أي شخص فضولي سيرغب أن يعرف ما حدث، وما السبب الكامن وراء ذلك أيضاً.

سنستعرض الآن مقترحات مطروحة عن الاصطدامات الضخمة المتواترة التي حدثت في مقياس زمني بعدة ملايين سنة على أمل ربطها ليس بحركة الأرض من خلال النظام الشمسي، وإنما بحركة النظام الشمسي عبر المجرة. بدراسة بيانات الحفر وبمحاولة تفسير ما تمت ملاحظته، نهدف إلى فهم ديناميكيات النظام الشمسي والكون، إضافة إلى ارتباطاتها الضمنية. أكثر المقترحات إثارة للاهتمام هي تلك التي تؤدي إلى تخمينات يمكننا أن نختبر الفرضيات بها- لكن على عكس ما قد يظنها المشكك. على الرغم من أن معظم الأفكار حول التواتر هي تخمينية، هدف هذا الفصل هو تفسير ما نتقبله وما نتوقع أنه يحتاج إلى المزيد من الدراسة.

توطيد فكرة التواتر

لم ننطلق مات ريس وأنا مباشرة في تحقيقنا عن إمكانية أن تفسر المادة المعتمة الظواهر الدورية في النظام الشمسي. قبل تقديم أفكارنا، أردنا أولاً أن نتأكد من أن الدليل على التواتر قوي بما يكفي ليستحق المزيد من الدراسة. ثمة اعتبار آخر مهم بالنسبة لنا وهو إذا قد تساعد الظروف في إرشادنا إلى ملاحظات وتحليلات مستقبلية.

عندما بدأنا، اجتمعنا في مكتبي الفوضوي وناقشنا الحالة الفوضوية عن الأفكار المطروحة- حيث وضحنا ما هو مفهوم وحولنا تحديد أنسب طريقة للمتابعة. كان ترتيبنا الأول للعمل هو دراسة الأدلة على التواتر والتحقق من مدى اعتماديتها أم أن التواتر كان مجرد كلمة مثيرة للاهتمام تبادلها العلماء.

قرأنا الكثير من البحث السابق. ولكن حراثة الأوراق وفك تشابك الادعاءات والحقائق كان أكثر تحدياً مما قد تتخيله. أدت إحدى النتائج إلى أخرى- بعض العلماء يجدون دليلاً على التواتر في إحدى مجموعات الأوراق ويتعرف علماء آخرون على أخطاء أو عيوب عند المؤلفين السابقين في المجموعة التالية من الأوراق. اشتعل النقاش، من دون أي حل حقيقي. بعد أن كتبنا دراستنا الأخيرة، حتماً جعل المشككون في دليل التواتر أفكارهم معروفة وواضحة. لكن، من حسن الحظ أننا لم نكن في موقع يجعلنا نتمسك برأينا. كنا فضوليين فقط، وأظن أن هذا قدم لنا بعض الموضوعية المفيدة.

إن التحليل الإحصائي الضمني الضروري إشكالي بحق، فالأرشيف الجيولوجي ضئيل جداً وحتماً سيحتوي على ثغرات كبيرة. نتيجة لنقص البيانات، يمكن أن تؤثر الطريقة الدقيقة التي يقيم فيها الباحث الأرشيف على نتائجه. من المثير أن ننظر إلى البيانات كشيء مقدس وأرض راسخة، ولكن الكثير من التفسيرات تدخل في تحديد طريقة تقديم وتقييم القياسات الفقيرة إحصائياً.

تصنيف البيانات يخلق اختلافاً، على سبيل المثال. عندما يدرس العلماء البيانات على أنها سلسلة زمنية، تواجههم خيارات شائكة من شأنها أن تؤثر على استنتاجهم، مثل كم عدد النقاط التي يجب استخدامها، وأين تحديداً في الفترة الزمنية يجب وضع جزء معين من البيانات. كما أنهم بحاجة إلى تقييم مدة الأحداث وفهم نتائج خياراتهم من أجل نقطة القوة خلال مدة النشاط القوي.

كذلك تؤكد المقالة التي كتبت كرد على تلك التي تبين الدورية على العديد من الأخطاء الإحصائية المحتملة التي من شأنها أن تعرض الدراسات للخطأ. يترأس كورين بيلر-جونز، من معهد ماكس بلانك لعلوم الفلك، في هيدلبيرغ، ألمانيا، هذا الاتهام. حيث يقدم الكثير من الاعتراضات- من بينها ما تم ذكره أعلاه. كما أنه قلق حيال "انحياز التأكيد"- حقيقة أن الأشخاص ميالون إلى ملاحظة أو نقل النتائج التي يوافقون عليها. يعتقد بيلر-جونز أنه ربما كان المؤلفون يبذلون جهدهم للحصول على توافق بسبب تقارب تلك الفترة من الفترة المقترحة للانقراض أو حركة النظام الشمسي التي سأناقشها في الفصل التالي. ولكن على الرغم من صحة العديد من اعتراضاته الأخرى، هذا التقارب ليس أمراً سيئاً بالضرورة. قد يكون هناك تصادف بالأرقام فقط. أو قد تكون إشارة إلى ارتباط علمي ضمني سيؤدي إلى فهم مستقبلي.

لكن، يشير بيلر-جونز وآخرون إلى خطأ شائع آخر وهو أنه لا يمكنك أن تقارن فرضية مع نموذج وحيد منافس من أجل أن تعتبر ذلك الاقتراح الوحيد البديل كبديل عن جميع الخيارات المتبقية الأخرى. على سبيل المثل، يسأل الناس عادة ما الذي يتلاءم من البيانات بشكل أفضل: فرضية أن النيازك كانت تضرب بتواتر منتظم أو أن احتمالية الضرب ثابت تقريباً مع مرور الوقت. حتى وإن نجح نموذج التواتر بشكل أفضل من افتراض العشوائية المطلقة، قد تتطابق البيانات بشكل أفضل مع نموذج مختلف مع ذلك- مثل احتمالية العثور على حفرة يقلل الاصطدامات النيزكية. بمعنى آخر، أن يبلي النموذج المفضل بلاء أفضل من الاقتراح البديل الوحيد لا يعني بالضرورة أنه صحيح. من حسن الحظ، يستطيع أن يناقش الباحثون هذا الخطأ من خلال توسيع مخزون النماذج المستخطمة للمقارنة معها. في غياب اختلاف حاسم في الاحتمالات، يصبح من المنطق أن تحاول مجموعة مختلفة من النماذج البديلة واختبار ما إذا كانت النماذج الدورية هي الأفضل.

يقدم تحديد إشارة دورية المزيد من العوائق. في عام 1988، أشار الجيولوجي ريتشارد غريف وشركاؤه أن التأريخ غير الدقيق من شأنه أن يلغي أي إشارة للدورية- سواء كانت الإشارة حقيقية أم لا. في عام 1989، جوليا هيزلر، طالبة غير متخرجة آنذاك، وسكوت تريماين، أستاذ في تورونتو آنذاك يعمل في المعهد الكندي لعلم الفيزياء الفلكية النظرية ويتراس الآن مجموعة الفيزياء الفلكية في معهد برينستون للدراسات المتقدمة، قاسا هذا التأثير بسؤال ما عدد الشكوك التي يمكن أن تنجو بها بينما تستطيع بشكل موثوق أن تحدد ظاهرة دورية. في مقالة نشرت عام 1989، ناقشت هيزلر وتريماين عن مقدار شك 13% يجعل من المستحيل الحصول على ثقة أفضل من 90% تشير إلى وجود دورية في البيانات. إذا ارتفع مقدار الشك إلى 23%، ينخفض احتمال اكتشاف إشارة دورية إلى نحو 55%. هذا المقدار من الشك لا يجعل من المستحيل إثبات تأثير دوري- إنما يجعله أكثر تحدياً.

كان التركيز في هذه المقالات التحذيرية على وجه التحديد على التأثيرات الدورية في علم الفيزياء الفلكية، الذي سيكون محط بحثي الذي سأشرحه عما قريب. ولكن الدافع الأولي في دراسة التبعية الزمنية للحفر جاء من الدراسة السطحية لموضوع مختلف- التواتر الظاهر في أحداث الانقراض. كان عالم الجيولوجيا في برنستون آلفريد فيشر ومايكل آرثر أول من قام بملاحظة أن الحياة بدت تزدهر وتنحدر بانتظام متواتر. استنتجا في عام 1977 أن أرشيف المستحاثات بدا يتوافق مع مدة 32 مليون سنة. نشر ديفيد راوب وجاك سيبكوسكي من جامعة كاليفورنيا مقالة أكثر تأثيراً في عام 1984، قدما فيها بحثهما عن التواتر في أرشيف الانقراضات. في البداية وجد راوب وسيبكوسكي نطاقاً واسعاً من الفترات المحتملة- ما بين 27 و 35 مليون سنة- قبل أن يعيدا تحليلاتهما وتعديل تقديراتهما إلى فترة 26 مليون سنة، التي عاد إليها الكثير من العلماء الذين يدرسون هذا الموضوع منذئذ.

من غير المحتمل أن تمر فكرة استفزازية كهذه من دون تحقق، فوجدت أبحاث لاحقة أدلة مساندة- ربما مع اختلاف ضئيل في المقياس الزمني. في عام 2005، باستخدام مقياس زمني معاير من جديد وأرشيف المستحاثات نفسه، تعرف فيزيائيان من جامعة كاليفورنيا، بيركيلي، روبرت رود وريتشارد مولر، على إشارة دورية مختلفة هي 62 مليون سنة. بقيت النتائج اللاحقة في تذبذب ولكن بشكل مثير للاهتمام، بقيت الإشارة الدورية 27 مليون سنة و 62 مليون سنة معاً. في واحد من التحليلات الحديثة والمعمقة، وجد آدريان ميلوت، أستاذ في علم الفلك في جامعة كنساس، وعالم المستحاثات ريتشارد بامباخ من متحف سميثسونيان الوطني للتاريخ الطبيعي في واشنطن العاصمة، أن معظم حوادث الانقراض حدثت خلال 3 مليون سنة ضمن قالب دوري من 27 مليون سنة، وإضافة إلى ذلك حدث دائماً تقريباً أثناء أوقات انخفاض تنوع الأنواع ضمن إطار زمني هو 62 مليون سنة، ما يشير إلى أن كلا الإطارين الزمنيين قد يكونان مرتبطان. لا تزال تنطبق جميع التحذيرات حول الدورية، ولكن يبقى هناك دليل ضعيف يؤيد الدورية.

لكن، حتى وإن تبين أن الانتظام الظاهر في أرشيف المستحاثات حقيقي، لن يغير حقيقة أن أحداً من المؤلفين لم يفسر لم يجب أن تكون حوادث الانقراض دورية ومتواترة. كما رأينا، يمكن أن تموت الأنواع نتيجة

أسباب متنوعة. بدا أن التغير المناخي، النشاط البركاني، الاصطدامات، وحركة الصفائح التكتونية كلها لعبت دوراً. قد تؤثر النيازك على بعض حوادث الانقراض الجماعي، وحتماً أحد هذه النيازك أثار حادثة انقراض ط.ب. ولكن من غير المحتمل أن تكون أي دورية مزعومة في الانقراضات هي نتيجة سبب جذري واحد. نظراً لآلية التعليل الفيزيائية المميزة، قد يتوقع المرء تراكباً لمختلف الظواهر الدورية، التي ستبدو عشوائية إلى حد ما في ظل غياب أرشيف كامل.

أي محاولة لربط حوادث انقراض دورية محتملة بعمليات فيزيائية حفزتها معرضة لأن تكون تخمينية أكثر من محاولات فهم التواتر في ظاهرة فيزيائية معينة، مثل الاصطدامات الفضائية، لوحدها. الاصطدامات النيزكية مثيرة بما يكفي لدراستها. ولكن ربطها بشكوك حول أحداث انقراض يعرضها للغوص في مشاكل لا حل لها.

بسبب هذه الشكوك- بعيداً عن الارتباط المبرهن الوحيد بين النيزك والانقراض ط.ب- سيتجنب بقية هذا الكتاب أي تخمينات إضافية عن أحداث الانقراض، مهما كانت مثيرة للاهتمام. سأركز عوضاً عن ذلك على الارتباط المحتمل بين الأحداث الدورية في الكون وبين الاصطدامات الدورية الكبيرة بما يكفي لتخلف أثراً في أرشيف الحفر. إن ميزة دراسة الاصطدامات هي أن أرشيف الحفر يرتبط بشكل مباشر بالفيزياء الفلكية وهو- على عكس الأسباب المحتملة للانقراض- لا يعاني من تدخل عبثي للمناخ، البيئة، أو البيولوجيا.

تزودنا الاصطدامات بفرصة مذهلة للبحث عن ارتباط بين الظواهر على الأرض وبين أحداث في النظام الشمسي ككل- عدسة فريدة يمكننا من خلالها أن نتعلم المزيد عن الكون. لا تستدعي الاصطدامات النيزكية العشوائية تفسيراً معيناً. على عكس الاصطدامات النيزكية الدورية. إذا كانت الاصطدامات النيزكية تحدث بتواتر منتظم حقاً، يمكن أن تدل التبعية الزمنية على سبب كوني ضمني.

سيبحث الفصل الحادي والعشرون ما قررنا أنا وشركائي أنه سيكون طريقة موثوقة أكثر لمعاينة البيانات في المستقبل والدعم الأكبر بقليل للدورية التي يمكن أن تنتجه البيانات الموجودة. في الوقت الحالي سأقدم بعض الاستنتاجات التمثيلية في الدراسات الأقدم، من دون الغوص في تفاصيل المنهج الإحصائي الدقيق أو خيار مجموعة البيانات.

سنرى الآن أن الكتابات الأقدم تظهر بعض الأدلة التي تدعم الدورية، ولكن الدليل أضعف من أن يجعلنا واثقين بالنتائج. قد تختفي مثل هذه الاستنتاجات المبهمة بوجود بيانات أفضل وتحليلات أكثر دقة أو قد ينتهي بها المطاف لتثبت المزيد من القوة. في الوقت الحالي، فكر بهذه النتائج كدليل على الاهتمام الذي أولاه العلماء في السابق إلى البحث في عنصر الدورية في بيانات الحفر- وربما الاستنتاجات المتفائلة التي وجدوها- بدلاً من الاستطلاع الشامل والاستخلاص.

الدورية في سجل الحفر

بأي حال من الأحوال، تقييد البيانات مطلوب عند البحث في دورية الحفر. تركز التحليلات على الحفر الأكبر والأحدث. فأي شيء اصطدم قبل زمن بعيد من شأنه أن يترك أثراً أقل موثوقية من غيره المماثل ولكن الأحدث. علاوة على ذلك، رغم أن عدد الحفر الأصغر أكبر بكثير من عدد الحفر الأكبر، يجب أن تضم البحوث عن الدورية الحفر الأكبر فقط. فالأجرام الصغيرة تضرب الأرض طوال الوقت- بعيداً عن التصادمات الشلالية من حزام الكويكبات- معظم هذه الأحداث عشوائية. تضرب مجموعة الأجرام التي تخلف حفراً صغيرة بشكل عشوائي. كما سيفسر الفصل التالي، تبدو الدورية الحقيقية ممكنة فقط بالنسبة للمذنبات، ومن بين هذه، فقط تلك القادمة من سحابة أوورت البعيدة.

لذا فإن هناك علاقة تبادل بين تسجيل أعداد أكبر (الذي يؤيد الحجم الأصغر) وبين تحديد ظاهرة دورية بشكل أكثر موثوقية (الذي يفضل الحجم الأكبر). الخيار المثالي غير معروف. تستخدم جميع التحليلات في المطبوعات القديمة أحجاماً مختلفة لرسم الحدود، الأمر الذي يجب على الجميع أن يبقيه في عين الاعتبار عند تقييم نتائج الأبحاث السابقة. في البحث الذي قمنا به أنا ومات، قررنا بالنهاية البحث في الحفر التي يفوق حجمها 20 كم ووصلت خلال 250 مليون سنة الماضية. يبدو حدنا الزمني 250 مليون سنة كبيراً بما يكفي لتوفير إحصاءات منطقية ولكن حديثة بما يكفي لتكون أكثر موثوقية. كما بدا 20 كم خياراً جيداً كحد حجمي لأنه كبير بما يكفي ليحتاج إلى اصطدام من جرم بحجم 1 كم، ولكن ليس كبيراً ليعيق البيانات الإحصائية ذات العلاقة.

حتى مع هذه القيود، يعد إثبات الدورية بشكل موثوق في سجل الحفر مهمة صعبة. إن آثار الحفر التي بقيت من تاريخ الأرض غير كاملة- وجزء صغير منها فقط لا يزال قابل للرؤية اليوم. فضلاً عن ذلك، تأريخ الحفر- في حال وعندما يتم اكتشافها- ليس دقيق بما يكفي دائماً لاستخلاص التبعية الزمنية للأحداث بشكل موثوق. لتعقيد الأمور أكثر استخدم الباحثون مجموعات بيانات مختلفة. حتى بالبيانات نفسها، استخدم الباحثون أحياناً فترات زمنية متقطعة مختلفة أو استخدموا طرقاً مختلفة في تصنيف البيانات. تعقد الموضوع أكثر لأنه، كما أشير سابقاً، حتى في حال حدثت بعض الاصطدامات بشكل دوري، تبقى بعض الاصطدامات عشوائية مع ذلك. هذا يعني أننا يمكننا أن نتوقع بأفضل حال عنصرا دوري متراكب على عنصر عشوائي، مما يعرض سجل إحصائي فقير للشبهة.

على الرغم من ذلك، متحفزين باقتراح ألفاريز عام 1980 بانقراض ط.ب المتأثر بنيزك من جهة، وبالدليل على الدورية في حوادث الانقراض، سار العلماء قدماً وبحثوا عن أدلة عن الاصطدامات الدورية، في عام 1984، بدأ ألفاريز وزميله من جامعة كاليفورنيا بيركيلي- الفيزيائي ريتشارد مولر- بدحرجة الكرة عندما اقترحا دورية كل 28.4 مليون سنة في الحفر التي يتجاوز شعاعها 5 كم والتي تشكلت خلال 250 مليون سنة الماضية. استندت نتائجهما على عينة من 11 حفرة فقط ولم يبررا بشكل صارم مقدار الخطأ في البيانات، ولكن تحليلات شاملة عديدة أخرى سرعان ما تلت.

لاحقاً في تلك السنة، اشترك عالم الأحياء من جامعة نيو يورك مايكل رامبينو مع ريتشارد ستوذرز من معهد غودارد لدراسات الفضاء التابع لناسا لدراسة عينة من 41 حفرة تعود إلى ما بين 250 مليون ومليون سنة وتعرفا على دورة زمنية كل 31 مليون سنة في اصطدامات من الفضاء. في عام 1996، اقترح علماء في اليابان أمراً مماثلاً- دورة كل 30 مليون سنة باستخدام حفر تعود إلى 300 مليون سنة على الأقل. في عام 2004، قام شين يابوشيتا، عالم بالرياضيات التطبيقية من جامعة كيوتو وأحد مؤلفي ذلك البحث، بتحليل أكثر دقة في حفر تعود إلى 400 مليون سنة على الأقل حيث ثقّل فيه أهمية كل حفرة بشكل مختلف بحسب حجمها. واستمد من ذلك دورة كل 37.5 مليون سنة من مجموعة من 91 حفرة. وجدت كل هذه التحليلات دليلاً على التواتر في سجل الحفر. ولكن هذه الدوريات المحددة لم تتوافق بشكل جيد بما يكفي لتدعم النتائج بقوة.

في عام 2005، قام ويليام نابير، أستاذ في مركز بكنغهام لعلوم الفضاء في إنكلترا، بدراسة مثيرة للاهتمام ادعى فيها أن الاصطدامات تميل للحدوث في مجموعات تنفصل عن بعضها بفارق 25-30 مليون سنة، وكل فترة تستمر لنحو مليون إلى مليوني سنة. ضمت عينته من 40 حفرة على تلك الأكبر من 3 كم التي تعود إلى أكثر من 250 مليون سنة. ووجد أن أكبر الاصطدامات حدثت خلال فترة زمنية قصيرة نسبياً وأشار إلى أن الانقراض ط.ب كان من بينها. ولكن كان الدليل على الدورية ضعيفاً، واستخلص تشكيلة من القياسات- بالاستناد إلى طريقة تفسير البيانات- بدت فيها فترة 25 مليون سنة و 35 مليون سنة هي السائدة.

لاحظ نابير بنفسه أن الدليل لم يكن كافياً ليشكل حجة قوية، وحتى أنه أشار إلى أنه مع بيانات أكثر بكثير مما توفر لدى ألفاريز، يمكن أن يتوقع المرء إما إشارة أقوى وإما أن تكون الإشارة قد اختفت. اقترح أن

تفسيراً معقولاً لغموض نتائجه هو أن هناك معدل ثابت نسبياً للأحداث العشوائية والدورية بحيث لا تظهر إشارة بشكل واضح- حتى بعد ضم البيانات إلى ثلاث مجموعات.

قدم نابير أيضاً بعض الاقتراحات المثيرة للاهتمام حول المذنبات مقابل الكويكبات كمصدر محتمل لإشارته الضعيفة المعترف بها. رغم أنه اعتقد أن النيازك الأصغر التي استبعدها من تحليله نشأت ربما في حزام الكويكبات، شك بأن المذنبات- وليس الكويكبات- كانت المسؤولة بشكل رئيس على النيازك الأكبر التي وجدها. وبرر بأن مخزون النيازك الكبيرة كان غير ملائم لتفسير الشدة اللازمة لمشهد القصف- بحجة أن الكثير من الكويكبات الكبيرة ستحتاج لأن تتحطم ضمن مقياس زمني قصير لتعليل ما تمت ملاحظته. أشار نابير أن عدم ملائمة سجل الحفر في الواقع دعم قضيته. إن لم تبق معظم الحفر حتى اليوم، يجب أن يكون عدد الاصطدامات أكبر من العدد الذي تمكن من تحديده من بقايا الحفر على الأرض. إن كنا نعلم بوجود بعض الحفر الكبيرة من مشهد قصف واحد، من المحتمل جداً أن المزيد من الاصطدامات حدثت ولم يتبق منها أثر.

علل نابير أيضاً أن أقل من 25/1 من الكويكبات التي تضطرب إلى مدارات تتقاطع مع مدار الأرض تضرب الأرض في الواقع. معظمها إما يتم دفعه إلى خارج النظام الشمسي وإما يقع إلى داخل الشمس. لتعليل التأثيرين، استنتج نابير أن مئات الكويكبات كان سيتم قذفها إلى مدارا قريب من الأرض من كويكب أب متحطم يصل على الأقل إلى 20- 30 كم ليعلل بياناته. كان سيكون هذا التحطم بسبب اصطدام. ولكن الاصطدامات تحطم الكويكبات بتواتر أقل بكثير مما يمكن أن تفسره هذه الأرقام. بما أن زمن الاصطدام القصير الذي يتراوح بين 1 إلى 2 مليون سنة ولا الإطار الزمني بدا ملائماً لتفسير مستند إلى الكويكبات، اقترح أن المذنبات هي المصدر الأكثر احتمالاً للدفعات الدورية التي تحقق منها. على الرغم من أن استنتاجاته مثبتة حتماً ونحن نعلم أن بعض الكويكبات تأخذ "مساراً سريعاً" يستغرق 1 إلى 2 مليون سنة، تقترح هذه الاستنتاجات أهمية نسبية محتملة للمذنبات مقابل الكويكبات لبعض الاصطدامات البارزة وربما طرق حتى لتمييزها بالنهاية.

"تأثير البحث في مكان آخر"

هذه مشاهدات مثيرة. ولكن ليس لأي من النتائج المقدمة أعلاه الأهمية الإحصائية اللازمة لإثبات التأثير الدوري بشكل حاسم. ولكن يبرز موضوع شائك إضافي آخر عند تحليل الأهمية الإحصائية، وهذا الموضوع، الذي ربما يعلل سبب التناقض في نتائج الكتابات المقدمة، لا يقهر.

قد تعتقد إذا قمت بتقديم فرضية أن البيانات دورية، يمكنك ببساطة أن تحاول مطابقة البيانات مع وظيفة دورية وتقييم مدى جودة الوظيفة الدورية المثلى في تفسير المشاهدات. لكن، قد يثمر هذا عن تقدير متفائل بشكل مبالغ به. عندما لا تكون تختبر فرضية واحدة ولكن لديك العديد من التخمينات المحتملة- في هذه الحالة وظائف بفترات مختلفة- التي تعطي احتمالات كافية، من شبه المؤكد سيتبين أن إحداها هي التوافق الأنسب للبيانات أكثر من العشوائية. ولكن هذا لا يبدو سليماً.

هذه المشكلة البارعة والواضحة نوعاً ما (بالنظر إلى الماضي على الأقل) تعرف في مجتمع فيزياء الجسيمات بمصطلح "البحث في مكان آخر". كانت هذه الظاهرة موضوع الكثير من النقاشات في محيط وقت اكتشاف بوزون هيغز في المصادم النووي الكبير LHC- مسارع الجسيمات العملاق في سيرن (المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية) بالقرب من جينيف الذي يصدم كل البروتونات الطاقوية في محاولة لإنتاج جسيم جديد يمكنه أن يقدم رؤية جديدة في النظريات الفيزيائية الضمنية. رغم أنه ليس موضوع هذا الكتاب، تلقي نتائج بحث هيغز الضوء على موضوع يواجهه العلماء الذين يبحثون عن الدورية أيضاً.

الطريقة التي يستخدمها المجربون في بحث جسيمات هيغز هي بالبحث عن دليل في بيانات الجسيمات التي يتحلل إليها بوزون هيغز ثم يقيسون مدى تواتر العثور عليه. لأن غالب الوقت عندما تصطدم جسيمات، لا ينجم بوزون هيغز، يظهر التدليل على وجود هيغز في البيانات بالإشارة المرتفعة على انحناء خلفي رقيق يمثل تلك الأحداث التي تحدث حتى أثناء غياب جسيم هيغز. إذا تم إعداده بالشكل المناسب، يجب أن يحدث هذا التقييم عند قيمة كتلة هيغز الصحيحة. لذا عندما يقدم المجربون بياناتهم، يركزون على "حدبة"، مناطق في البيانات يعطي فيها شيء- على أمل أن يكون بوزون هيغز- مشاركة كبيرة فوق الخلفية.

التحذير هو أن ضربة الحظ الإحصائية تلك (المعروفة تقنياً بالتذبذبات) قد تؤدي إلى تقلبات في البيانات طوال الوقت. يحدث أحياناً تذبذب كبير. رغم أن أي تذبذب معين غير محتمل، حتى التذبذب غير المحتمل يجب أن يحدث في مكان ما إذا درست نطاقاً كبيراً بما يكفي من الكتل. هذا الحدث غير المحتمل سيبدو بهيئة بوزون هيغز. ولكنه سيبدو تراكم أحداث خلفية غير محتمل في كتلة ظاهرة معينة.

عندما بدأ المجربون البحث في البداية، لم يكونوا يعرفون كتلة بوزون هيغز بعد. يستطيعون أن يقيسوا الكتلة إذا وعندما يجدون الدليل المناسب، لأن الطاقة والكتلة من المنتجات الخارجة المتحللة سوف ترتبط بطريقة تحدد قيمتها. ولكن استطاع الباحثون تحديد الكتلة فقط بعد أن رأوا تحدباً- وليس الطريقة العكس.

عندما قدم المجربون بياناتهم وناقشوا مدى احتمالية أو عدم احتمالية أي تحدب تعرفوا عليه سيكون في حضور أو غياب بوزون هيغز، كان عليهم أن يعللوا الشكل في قيمة كتلة بوزون هيغز. لأن التذبذبات الإحصائية يمكنها أن تحدث في أي مكان، ويمكن تفسير أي منها على أنها تحلل بوزون هيغز، تعرضت الأهمية الإحصائية لأي تحدب للشبهة بالاحتمالية الأعظم بأن تذبذباً ما سيحصل في مكان آخر. كان المجربون مدركين لهذا الأمر، لذلك قدموا أهمية نتائجهم مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير البحث في مكان آخر. يخبرنا تأثير البحث في مكان آخر أن النتائج ستكون أكثر أهمية إذا كنت تعلم كتلة بوزون هيغز مقدماً. إذا لم تعرفه، من المحتمل أن يكون أي تحدب تذبذباً بما أنك تضرب احتمالية ارتفاع كبير غير معروف في البيانات بعدد الأماكن التي يمكن لهذا الحدث غير المحتمل أن يحدث فيها. فقط بعد أن ولدت التجارب بوزونات هيغز قابلة للاكتشاف لتقديم نتائج ذات أهمية إحصائية- حتى بعد أخذ تأثير البحث في مكان آخر بعين الاعتبار- استطاع الفيزيائيون أخيراً أن يعلنوا الاكتشاف.

تنطبق اعتبارات مماثلة عند البحث عن الدورية في سجل الحفر إذا لم يكن لديك معرفة مسبقة عن الدورية التي تبحث عنها، رغم أن علماء فيزياء الفلك يستخدمون اسماً مختلفاً: عامل التجربة. إذا أخذت بعين الاعتبار فترات مختلفة كافية، من المحتمل أن أحدها سيبدو أفضل من لا شيء- أي بيانات عشوائية بالكامل. كما يتبين، توافقت النماذج التي اشتملت على ضربات نيزكية دورية مع البيانات بشكل مناسب- على الأقل أفضل من النموذج الذي افترض أن الاصطدامات كانت عشوائية بشكل كامل. ولكن بما أن أحداً لم يعرف أي فترة يجدر توقعها، أي أهمية إحصائية يستطيع الباحث أن يقدرها بالاعتماد على توافق أفضل وحيد كانت أقل مما سيستنتجه بشكل أولي. في حال إعطاء ما يكفي من الاحتمالات، كل احتمال مع مقدار الخطأ الإحصائي الممكن الخاص به، يفترض في النهاية أن وظيفة دورية ما ستبدو توافقاً منطقياً جيداً مع البيانات.

هذا شوط بعيد نحو تفسير التعارض بين نتائج كورين بيلر جونز، حيث لا يجد دليلاً إحصائياً على الدورية، وبين نتائج زميله الذي يجد دليلاً إحصائياً. قام كلاهما بتحليلاتهما الخاصة بشكل سليم، ولكن بيلر-جونز حلل بأننا لا نعلم الفترة مسبقاً. من دون مدخلات إضافية، تحتاج الإشارة أن تكون قوية بما يكفي لتتجاوز هذا التأثير المثير لتشوه النتائج. وبدا في البداية كما لو أن الإشارة لم تكن راسخة بما يكفي.

الأخبار الجيدة هي أن لدينا فعلاً مدخلات إضافية، ويمكننا أن نأخذها في عين الاعتبار. نحن نعلم مم صنعت المجرة بما أن علماء الفلك، إلى حد ما، قاسوا محتوياتها وشدتها التجاذبية. إذا كانت التأثيرات الدورية تتحرض بفعل حركة النظام الشمسي، يمكننا أن نجمع كل ما نعرفه عن المجرة وموقع الشمس فيها لنخمن

حركتها ونقارن التخمين مع البيانات. عند تطبيق آلية التحريض التي سأعرضها في الفصل التالي، هذا تماماً ما قررنا أنا ومات أن نفعله.

لعلك رأيتَ الرقصات المُنسَّقة التي تؤديها فرقة روكيت Rockettes في قاعة راديو سيتي ميوزك هول Radio City Music Hall في مدينة نيويورك، أو الفرق الموسيقية في البرامج التلفزيونية القديمة، حيث تتراقص مجموعة من النساء المتأنقات بحركات رشيقة حول دائرة. بعض تشكيلات اللوحة الراقصة تتضمن مجموعة من الراقصين ينطلقون من مركز مشترك، في حين تتألف أخرى من أفراد يشكلون حلقاتٍ الواحدة داخل الأخرى. يحافظ الراقصون على دوائرهم بسلاسة، فلا ندرك مدى صعوبة الحفاظ على العلاقة الدقيقة بين الأفراد. وهذا ينطبق بنحو خاص على الأعضاء في الأطراف الخارجية، الذين يتحركون أسرع ممن هم في الداخل، كما أنهم أبعد عن المنطقة الداخلية التي ينطلق منها التنظيم والتعليمات. قد ترى أحياناً راقصة في الحلقة الأبعد تواجه هذه التحديات، فتخطئ ولا تعود حركاتها متزامنة مع البقية. ولكن ما لم تقع أرضاً، فليست بالمشكلة الكبيرة. على الرغم من أن الخطأ سينتقص من جمال الأداء وكماله، الناتجين من تزامن حركات الراقصات، فلا شيء مأساوي أو كارثي.

تُواجه الأجرام الجليدية في سحابة أوورت– التي تبعد عشرات آلاف أضعاف بُعد الأرض عن الشمس– تحدياتٍ تشبه الراقصات في الحلقة الخارجية. فأعضاؤها بعيدون جداً عن جاذبية الشمس إلى درجة أن توازنها غير مستقر نسبياً. واضطرابٌ قوي بما يكفي قد يسبب حركة جسم- مثل الراقصة الأقل دقة- ببطء إلى خارج موقعه المتوقع. إذا اقترب جرم في سحابة أوورت إلى المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية، فإن عدداً كافياً من الدفعات – أو دفعة واحدة شديدة– ستقذف به إلى خارج مساره تماماً. عندما يحدث هذا الأمر، سينحرف ذلك الجرم عن مساره أكثر من الراقصة الشاردة، مُخاطراً بالاندفاع نحو المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية، بل حتى من المحتمل نحو الأرض.

كذلك فإن الكويكبات القريبة من الأرض، إضافةً إلى بعض المذنبات قصيرة الأمد الشاردة، قد تحتك بكواكب أو أجرام محلية أخرى تدفعها بحيث تضرب الأرض بين الفينة والأخرى. ولكن من شبه المؤكد أن مثل هذه الاصطدامات عشوائية. وقد اقترح العلماء عدة اقتراحات حول آلية إثارة الاضطرابات الدورية تنطبق فقط على المذنبات من سحابة أوورت. فسحابة أوورت، هي المصدر الوحيد للمذنبات طويلة الأمد التي تدخل المجموعة الشمسية، وربما كانت أيضاً مصدر معظم المذنبات المقتربة من الشمس، كما أنها المصدر المقترح الوحيد لاصطدامات المذنبات التي تدخل المجموعة الشمسية بانتظام. والفترات الدورية المقترحة لأحداث الانقراض وسجل الفوهات التي تناولناها في الفصل السابق أثارا كثيراً من الاهتمام بالعمل على تحديد ما قد يحفّز اضطرابات تقذف بالأجرام الجليدية من سحابة أوورت بانتظام إلى المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية.

في هذا الفصل سأتناول باختصارٍ موضوعَ ما إذا كانت المذنبات أو الكويكبات هي التي كان لها الأثر الكبير. سأستعرض بعد ذلك بعض المقترحات الأولية لما يمكن أن يُخرِج الأجرام من سحابة أوورت لتتحول إلى مذنبات يمكنها أن تضرب الأرض. على الرغم من فشل هذه الأفكار القديمة في تبرير الانتظام المقترح، فإنها مع ذلك مثيرة للاهتمام من حيث إنها شجعت طرقاً جديدة للتفكير في تفاعلات المجرة. كما أنها مهدت الطريق لاقتراحنا اللاحق والجديد والأكثر وعداً، والذي يستند إلى فكرة المادة المعتمة المقترحة التي اقترحناها حديثاً.

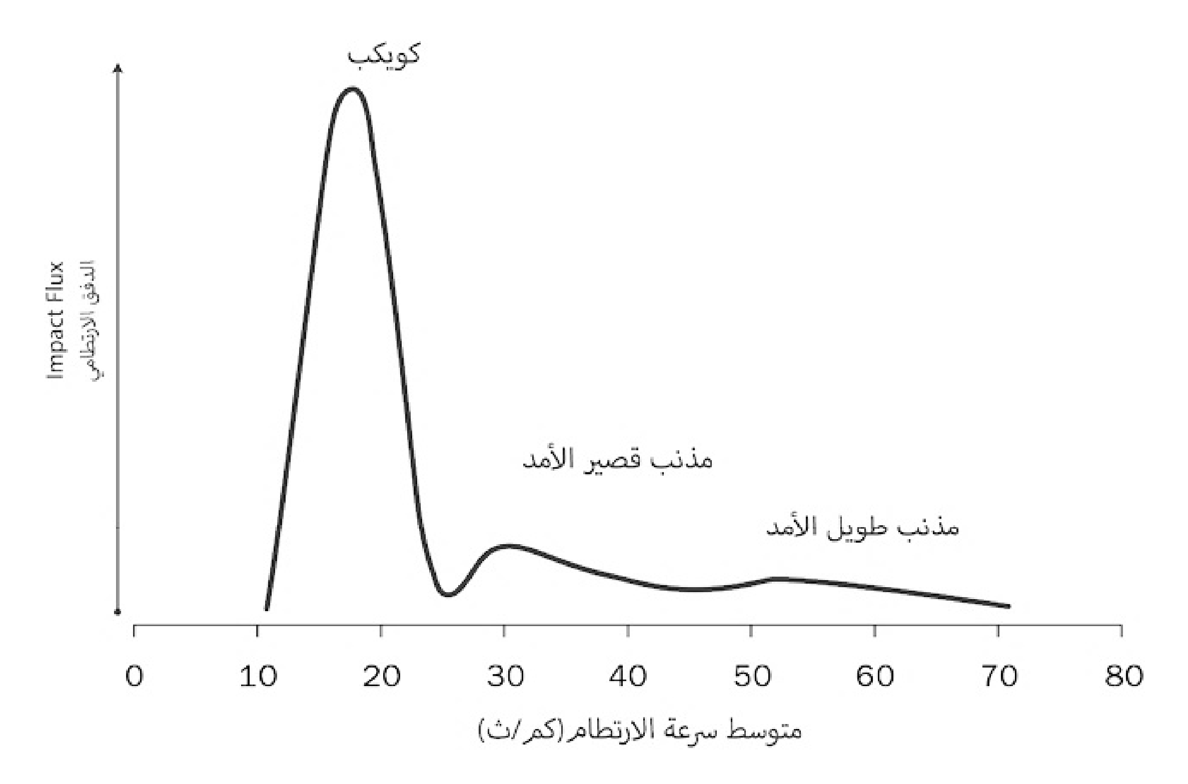
الكويكبات مقابل المذنبات

إذا كان الصادم المسؤول عن تشيكشولوب هو كويكباً، فليس للمادة المعتمة أي علاقة بالأمر. ولكن إذا كان مذنب هو سبب الكارثة، فإن محفزاً من المادة المعتمة الغريبة قد يكون هو الجاني. في كتابه تي ريكس وفوهة الهلاك T. rex and the Crater of Doom استخدم وولتر ألفاريز Walter Alvarez "مذنب" كافتراض اعتيادي Default عند مناقشة الصادم المسؤول عن انقراض K-Pg، مع إدراك أن أحداً لا يستطيع بنحو قاطع أن يحدد ما إذا كان مذنب أو كويكب هو المسؤول. من الصعب التمييز بين تأثيرات المذنبات والكويكبات التي تخلف فوهات- بصورة خاصة تلك التي سقطت على الأرض قبل ملايين السنين. إذا لم يرصد أحدٌ المسار، فعادةً لا تكون لدينا طريقة لمعرفة ما إذا كان الجرم الذي ضرب هو مذنباً أو كويكباً. وفي حالة المذنب الذي دمر الديناصورات، لم يُتخَذ القرار بعد.

نحن نعلم أن المذنبات وشظاياها تضرب الأرض بتواتر أقل. إذ تتراوح تقديرات التواتر النسبي لاصطدامات المذنبات مقارنةً باصطدامات الكويكبات بين 2 و25%. يتوافق هذا المعدل المنخفض مع العدد القليل للمذنبات القريبة من الأرض. من بين 10 آلاف جرم قريب من الأرض نعلم به، من المعروف فقط أن نحو 100 هي مذنبات، في حين تتألف البقية من كويكبات ونيازك أصغر.

ولكن الاصطدامات الأكبر لا تنشأ بالضرورة فقط من أجرام قريبة بالفعل. فقد تهرب المذنبات البعيدة من مداراتها لتضرب الأرض أحياناً أيضاً. إذ جادلت دراسة مثيرة للاهتمام لعالم الفلك الاستثنائي جين شوميكر Gene Shoemaker بأنه على الرغم من أن الكويكبات هي سبب أغلب الاصطدامات الأصغر، فإن المذنبات قد تكون أكثر أهمية في الاصطدامات الأكبر. رسم شوميكر عدد الاصطدامات مقابل الحجم، ووجد أن النتائج بدت تعتمد على مجموعتين منفصلتين. إذ شكلت معظم الاصطدامات الصغيرة منحنىً متناسقا، ولكن كان هناك مزيد من الاصطدامات الضخمة التي لا يمكن لها أن تقع على هذا المنحنى البسيط. ولمعرفته أن الكويكبات هي التي سببت الاصطدامات الأصغر، افترض شوميكر أن مصدراً جديداً للاصطدامات هو الذي أنتج الاصطدامات الأكبر- وجادل بأن ما شاهده كان ناتجاً عن منحنيين منفصلين يمثلان مساهمتين مستقلتين. فخمَّن أن مصدر الاصطدامات الأكبر هو المذنبات.

للمذنبات خاصية إضافية: إنها تحمل كميات متفاوتة من الطاقة مقارنةً بالكويكبات، لأنها تتحرك عموماً بسرعة أكبر- وصولاً إلى نحو 70 كم/ث أو أكثر، وذلك مقارنةً بسرعة الكويكبات التي تتراوح بين 10 و30 كم/ث. نمطياً يتحرك الصاروخ الباليستي بأقل من 11 كم/ث، والكويكب نحو 20 كم/ث، والمذنب قصير الأمد بسرعة نحو 35 كم/ث، والمذنب طويل الأمد بسرعة 55 كم/ث. كما أن لبعضها سرعات أكبر (انظر: الشكل 32). فطاقة الحركة Kinetic energy تتزايد ليس فقط مع الكتلة، ولكن مع مربع السرعة أيضاً. تعني السرعة الأعلى للمذنبات أنه حتى الاصطدامات المذنبية الأقل تواتراً، أو الاصطدامات من أجرام أصغر، يمكنها من حيث المبدأ أن تسبب ضرراً أكبر من الكويكبات الأقل سرعة.



[الشكل 32] متوسط سرعة الاصطدامات بالأرض من كويكبات ومذنبات قصيرة الأمد ومذنبات طويلة الأمد (كم/ث). يبين المنحني أيضاً الدفق الارتطامي- المتوقع لأنواع الأجرام الثلاثة.

إضافةً إلى ذلك أجرى شوميكر تحليلات كيميائية دعمت اقتراح المذنبات– ولكن من باب الإنصاف تجدر الإشارة إلى أن العلماء الذين أجروا هذه التحليلات جادلوا لمصلحة الطرفين. فتأييداً لفرضية الكويكبات المنافسة، تتوافق معدلات النظائر وشظايا الأحجار النيزكية المتبقية مع نسبتها على الكويكبات الكوندريتية Chondritic asteroids، التي تحتوي على قطع كروية بحجم 1 مم كانت في ما مضى قطيرات منصهرة تشكلت في عواصف سديمية قبل 4.56 بليون سنة، في أثناء تشكُّل المجموعة الشمسية. غيرَ أن الدليل ليس قاطعاً بعد. فنحن لا نعرف معدلات النظائر في المذنبات، لذا قد نجد أنها تماثلها أيضاً. إضافةً إلى ذلك، تجادل أبحاث حديثة لمصلحة مستويات من الإيريديوم والأوزميوم أكثر انخفاضا مما كان متوقعاً في السابق، والتي ستكون متوافقة أكثر مع تفسير المذنب.

في العام 1990، جادل عالما الفيزياء الفلكية كيفين زانِل Kevin Zahnle وديفيد غرينسبون David Grinspoon لمصلحة اصطدام مذنبي في تشيكشولوب مستخدمَين تفسيراً مختلفاً. فقد اقترحا أنه لتفسير وجود الأحماض الأمينية في الطبقات الرسوبية المحيطة بالطبقة K-Pg فإنه يتعين على غبار المذنب أن يدخل الأرض قبل وبعد حادثة الانقراض K-Pg. ولأن جسيمات الغبار تعلق في الجو وتسقط ببطء ومن ثم تصل إلى الأرض وهي سليمة ومتماسكة، يمكن أن يكون الغبار من حيث المبدأ نتيجةً لتحلُّل مذنب خلال فترة طويلة من الزمن– وأمطر المواد على الأرض.

ولعل أحد الأسباب التي تجعل الاصطدامات المذنبية تحدث بنحو أكثر تواتراً مما هو متوقع هو أن المشتري عندما يحيد مسارات المذنبات ويقذفها نحونا فإنه يحطمها أحياناً إلى أجزاء. وإذا ما حدث هذا الأمر، يزداد احتمال وصولها إلى الأرض، ما دامت مسارات عديد من هذه الشظايا ستتقاطع مع مدار الأرض. يخمن بعض علماء الفلك أن هذا قد حدث قبل عدة آلاف سنة، ويشيرون إلى الغبار المذنبي المفرط في المنطقة الداخلية للمجموعة الشمسية باعتباره الدليل على ذلك.

كان اصطدام مذنب شوميكر-ليفي Shoemaker-Levy comet بالمشتري الحديث نسبياً مثالاً مذهلاً للدمار الذي قد يلحقه هذا المذنب. رصدت كارولين شوميكر Carolyn Shoemaker المذنب لأول مرة بالقرب من المشتري في العام 1993، وتابعته مع زوجها جين، وزميل آخر، ديفيد ليفي David Levy. لاحظ الثلاثة أن للمذنب مظهراً غريباً، إذ لا يظهر كخط واحد في السماء، بل كقوس مرقَّط ببقع كروية متوهجة. لاحقاً، وبفضل الأرصاد الدقيقة، تمكن عالما الفلك جين لو Jane Luu وديفيد جويت David Jewitt من تحديد 17 قطعة منفصلة على الأقل شكلت قوساً يشبه عِقداً من اللؤلؤ.

ومن مساره استنتج عالم الفلك بريان مارسدين Brian Marsden، من المكتب المركزي للبرقيات الفلكية Central Bureau for Astronomical Telegrams، أن بنيته الغريبة هي نتيجة طيران منخفض قريب جداً من المشتري، الذي حطمت جاذبيتُه المذنب إلى شظايا أصغر. واقترح احتمال اقترابه أكثر أو حتى الاصطدام بالمشتري في المستقبل. تابع علماء الفلك دراسة المذنب، وحسبوا أن جاذبية المشتري ستطبق على الشظايا بالفعل، مما سيؤدي إلى اصطدام في الفترة ما بين 16 و22 يوليو من العام 1994.

بالفعل، وتماماً على الموعد، غاصت الشظية الأولى إلى غلاف المشتري بسرعة تتجاوز 60 كم/ث. وكانت المنطقة المتضررة المرصودة بحجم الأرض على الأقل. أضاء الغلاف باشتعال الغبار الذي سبق الشظايا الفعلية التي ولَّدت بدورها وميضاً متوهجاً. كانت هذه التأثيرات المتولدة مشابهة لتلك المحيطة بتشيكشولوب– ولكن هذه المرة حدث الضرر على المشتري. ولأن الشظايا كانت أقل من 300 م عرضاً والمذنب الأولي الذي خلف الشظايا كان بحجم بضعة كيلومترات حداً أقصى، كانت الطاقة المنبعثة أقل بكثير من تلك التي أطلقها الجرم الذي خلف تشيكشولوب. على الرغم من هذا، كان مشهداً مذهلاً.

تشير الفوهات الصدمية على أقمار المشتري إلى أن هذه لم تكن المرة الأولى التي يحدث فيها هذا الحدث، وأن الاصطدامات سبق أن حدثت في المنطقة، وإذا تبين أن فكرة النيازك الدورية صحيحة، فسيكون ذلك دليلاً إضافياً على أهمية المذنبات عبر تاريخ المجموعة الشمسية. ارتباط هذه الظاهرة الفيزيائية الفلكية بأسطح الكواكب يذكرنا بأنه حتى البحث النظري الذي يبدو بحثاً مجرداً قد يساعد في النهاية على تفسير وجودنا.

المحفزات

على الرغم من أنه لا أحد متأكد تماما، سأفترض إلى نهاية الكتاب أن المذنبات من سحابة أوورت هي المسؤولة عن الاصطدامات الضخمة. إنه الاحتمال الوحيد المعروف الذي يمكننا أن نفسر به الاصطدامات الدورية. على الرغم من أن اضطراب جرم جليدي في المنطقة الخارجية للمجموعة الشمسية والذي يدفع الجرم نحو مدار كوكبنا قد يبدو خيالاً علمياً– وليس بنحو خاطئ، ما دام ذلك يحدث عادةً– فإن تسلسل الأحداث هذا هو علم أيضاً.

تذكرْ أن الأصقاع البعيدة من المجموعة الشمسية تحتوي على سحابة أوورت– مجموعة افتراضية، كروية نوعاً ما، تتألف من أجسام صغيرة قد تمتد إلى ما بعد 50 ألف ضعف المسافة بين الأرض والشمس. الدليل على وجود هذا المصدر الهائل للمذنبات– الأبعد من أن نتمكن من رصده– هو تحديداً المذنبات القابلة المرصودة التي دخلت النطاق الداخلي للمجموعة الشمسية.

على العكس من حالة الراقصات المذكورة آنفاً، فإن جاذبية الشمس– وليس التفاعل المشترك بين أجرام سحابة أوورت– هي المسؤولة عن إبقاء الأجرام الجليدية في سحابة أوورت ضمن مداراتها. ولكن الشمس تربط الأجرام بالسحابة بجاذبية ضعيفة، لأن السحابة بعيدة جداً. تتناقص قوة الجاذبية تناقصاً يتناسب عكسياً مع مربع المسافة بينهما، لذلك فإن شدة تأثيرها في جرم يبعد مسافة عشرات آلاف الأضعاف هي أقل بنحو 100

مليون ضعف. وجذب الشمس للمذنبات في سحابة أوورت أضعف بكثير من جذبها للأرض. في مثل هذه البيئة من الجاذبية الضعيفة، حتى الاضطرابات الصغيرة نسبياً يمكنها أن تغير مسار جرم في سحابة أوورت، وأن تدفعه في النهاية إلى خارج مساره– لتقذفه إلى خارج المجموعة الشمسية بكاملها أو لترسله مسرعاً إلى الداخل نحو الشمس.

على الرغم من أن عالم الفلك يان أوورت Jan Oort رسَّخ الفكرة أكثر لاحقاً، اقترح عالم الفلك الإستوني إيرنست جوليوس أوبيك Ernst Julius Öpik في العام 1932 أن الاضطرابات التي تصيب المذنبات في الحافة الخارجية من المجموعة الشمسية (فيما يُعرف الآن بسحابة أوورت وأحياناً سحابة أوبيك-أوورت) تدفع أحياناً هذه الأجرام الجليدية نحو المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية. أدرك أوبيك القصة بكاملها بنحو صحيح– معللاً أن بعض الأجرام الجليدية ستصبح في النهاية غير مستقرة، وعرضة للاضطرابات بحيث تدفعها بعض التأثيرات الخارجية أحياناً خارج مداراتها إلى مسار يتجه نحو الأرض. بل اقترح أن هذا قد يؤثر في الحياة هنا، على الرغم من أنه لم يتصور بالضرورة وقوع دمار عالمي من النوع المصاحب للانقراض K-Pg.

بَيْد أن عمل أوبيك المذهل خلَّف لنا سؤالاً مفتوحاً، وهو: ما سبب عدم استقرار المدارات؟ أو ما الدافع الذي أدى إلى هروبها؟ لم تُعالج هذه الأسئلة إلا بعد سنوات عديدة، عندما أدخل ألفاريز اقتراحه (والحرب الباردة وصورها عن الدمار الشامل) دائرة الوعي العام، وأعاد إحياء الاهتمام به.

تشمل أمثلة على الأجرام التي اقترح الفلكيون أنها اضطرابات أجراماً مثل النجوم المارة القريبة والسحب الجزيئية العملاقة– تركيزات هائلة من الغاز الجزيئي بكتلة تتراوح بين ألف و10 آلاف ضعف كتلة الشمس. ولكن على الرغم من أن الأولى تغير المدارات في حين للأخيرة بعض التأثير فيها، فإن أيا منهما ليست الآلية السائدة لإرسال المذنبات إلى النطاق الداخلي للمجموعة الشمسية. يعتمد تأثير الدفع على الحجم والتواتر الذي يحدث فيه، وأيضاً على كثافة وكتلة الأجرام الجليدية التي تعمل عليها. لا النجوم ولا السحب الجزيئية لديها القوة والتواتر الكافيان لتفسير المذنبات التي نراها.

في العام 1989، درست جوليا هايزلر Julia Heisler وسكوت تريماين Scott Tremaine تأثيراً أكثر أهمية، وهو القوى المدِّية Tidal force في درب التبانة. يولِّد القمر المد البحري المألوف بفعل تأثير جاذبيته التي تحدب المياه في البحر Distorting، مما يسبب ارتفاع مستوى سطح البحر وانحساره بدرجات متباينة على المناطق الأبعد عنه أو الأقرب منه على الأرض. بالمثل، يحني المد المجرِّي Galactic tide الذي تسببه مجرة درب التبانة مداراتِ أجرام النطاق الخارجي للمجموعة الشمسية. يعمل سحب جاذبية درب التبانة بطريقة مختلفة على الأجرام التي ليست في الموقع نفسه بالضبط، فيشوه سحابة أوورت الكروية بحيث تصبح مستطيلة الشكل في الجهة المقابلة للشمس ومضغوطة في الاتجاهين الآخرين.

بمرور الوقت، ستحرف قوة جاذبية مجرة درب التبانة مسارَ الأجرام الصغيرة إلى مدارات طويلة جداً، أو غريبة الأطوار. ولا تكاد تصبح غريبة الأطوار بما يكفي، حتى يكون الحضيض الشمسي Perihelion – مسافة أقرب اقتراب إلى الشمس– ضئيلاً جداً إلى درجة أن الأجرام يمكن أن تُقذف بسهولة أكبر مسرعةً نحو النطاق الداخلي للمجموعة الشمسية. يمكن أن تكون القوى المدية في هذه المرحلة كافية لدفع الأجرام الجليدية إلى خارج سحابة أوورت لتزيد من اندفاع المذنب نحو الداخل. والنتيجة هي تدفق بطيء وثابت للمذنبات التي تصل إلى الأرض.

لجعل الأمور أكثر إثارة، تبيّن أن الآلية السائدة لإزاحة الأجرام الجليدية كي تندفع كمذنبات إلى النطاق الداخلي للمجموعة الشمسية لا تعتمد فقط على المد والجزر، ولكنها تشتمل أيضاً على اضطرابات نجمية ومدية تعمل معاً مجتمعة. على الرغم من أن الاضطرابات النجمية ليست في النهاية هي التي تؤدي عادة إلى زخات المذنبات، لأنها تحدث ضمن نطاقات زمنية أكبر من التأثير المدي، غيرَ أنها أساسية في تهيئة سحابة أوورت وصولاً إلى نقطة يكون فيها التفاعل المدي حيوياً. إنها مثل فريق دراجات في سباق جولة فرنسا Tour de France. يساعد بقية الفريق الراكب الأساسي في تثبيت مكانه بحيث يصبح قادراً على إتمام الجولة الأخيرة

التي ستُكسبه القميص الأصفر. ولأنه يجتاز خط النهاية أولاً، نحن عموماً نعرف عادة فقط اسم الفائز- لا الأعضاء المساندين. مع ذلك، أدى اللاعبون الآخرون دوراً مهماً. بالمثل، على الرغم من أن الدافع المباشر لإزاحة المذنبات هو القوى المدية، فإن السبب في قدرتها على بذل سحبٍ كافٍ هو أن الاضطرابات النجمية سبق أن غيّرت المدارات بما يكفي ليصبح بعضها في مواقع متقلقلة بحيث يؤدي دفع بسيط نسبياً إلى قذف المذنب إلى النطاق الداخلي للمجموعة الشمسية. التفاعلات النجمية مهمة، ولكن المحفز الفعلي للمذنب- المحفز الذي يحظى بالفضل- هو القوى المدية في المقام الأول.

المسافة التي يهيمن فيها المد المجرِّي على جاذبية الشمس هي نحو 100 ألف- 200 ألف وحدة فلكية AU من الشمس. على الحدود الخارجية لسحابة أوورت، لا يعود تأثير جاذبية الشمس كافياً للحفاظ على مدارات مستقرة. لقد رأينا من فورنا كيف تؤدي التأثيرات المدية إلى اضطراب المدارات الحدودية المستقرة، فتؤدي أحياناً إلى إزاحة جرم صغير من المجموعة الشمسية، وتدفعه نحو النطاق الداخلي لها. في مناطق أقرب- مناطق قابلة للرصد- يضعف التأثير المدي مقارنة بسحب الشمس. لذا فقط في سحابة أوورت يمكن للتأثير المدي أن يؤثر تأثيرا كبيرا في المذنبات الضعيفة الجاذبية. ومن المحتمل جداً أن تكون هذه التأثيرات المدية هي المسؤولة عن 90% من المذنبات التي تنشأ هناك.

لذا فإن مجرة درب التبانة لديها القدرة على إثارة اضطراب المذنبات لإرسالها في مسارات باتجاه النطاق الداخلي للمجموعة الشمسية بفعل تأثير الجاذبية الذي يفهمه علماء الفيزياء والفلك حالياً. ولكن هذه الآلية-على الرغم من أنها مهمة ومثيرة للاهتمام- لا تكفي لحساب كل زخات المذنبات أو الخاصية الدورية في اصطدامات المذنبات. في غياب أي تعقيدات أخرى، تؤدي القوى المدية التي شرحتها من فوري إلى تدفق بطيء ولكنه ثابت.

لذلك فإن علماء الفلك في محاولتهم شرحَ التحفيز الدوري Periodic enhancements اقترحوا عديداً من التنبؤات لتفسير لمَ قد لا تكون المحفزات لهذه المذنبات عشوائية بالكامل، ولكن قد تحدث بدلاً من ذلك على فترات منتظمة ضمن نطاق يمتد عشرات الملايين من السنين. سأقول مقدماً إن التفسيرات المقترحة التي أُوشك على تقديمها لم تنجح. ولكن فهم هذه الاقتراحات وسبب فشلها يساعد على توجيه البحث إلى البدائل. كان أحد هذه المقترحات هو البذرةَ لمقترح المادة المعتمة الذي سأشرحه لاحقاً.

اقتراح المنتقم

أول الاقتراحات- وأكثرها رنيناً- لتفسير الاصطدامات الدورية هو أنه كان للشمس نجم رفيق سُمي بقدر من الدعابة بالمنتقم Nemesis، وكان المنتقم والشمس يدوران في نظام ثنائي Binary system شاسع الأبعاد. اقترح الفلكيون مداراً إهليليجياً تماماً للنجم المرافق الافتراضي مما يتيح له أن يمر على بعد 30 ألف وحدة فلكية منا كل 26 مليون سنة. كان اقتراح عام 1984 هذا محاولة لتبرير دورية الانقراض- التي اقترحها راوب وسيبكوسكي- بفعل جاذبية الشمس المعززة كل 26 مليون سنة بفعل النجم المنتقم عندما يكون في أقرب نقطة له من الشمس. وذهب الاقتراح إلى أنه في تلك الأوقات، سيزيح تأثيرُ جاذبية النجم المنتقم من سحابة أوورت أجراماً صغيرة من أجسام المجموعة الشمسية يمكنها أن تقصف الأرض كمذنبات لاحقاً.

تتطلب فترة 30 مليون سنة من المواجهات المُحسنة بفعل الجاذبية (ومن ثم ازدياد معدل اصطدام المذنبات) نظاماً شاسعاً جداً، مع محور شبه رئيس (يعادل نصف طول الإهليلج) يمتد إلى سنة ضوئية أو اثنتين. ولعل أحد الاعتراضات على هذا الاقتراح هو أن النجوم أو السحب البينجمية ستجعل مثل هذا النظام الثنائي الشاسع غير مستقر، وستفسد انتظام المواجهات المفترضة وتُسبب تباين المعدل على مدى 250 مليون سنة. ولكننا لم نعثر على مثل هذا الاختلاف.

ولكن المسمار الفعلي في نعش هذه الفكرة هو فهرس مسح الأشعة تحت الحمراء لكامل السماء المُحسّن– والذي كان ينبغي أن يحتوي على النجم المنتقم لو كان موجوداً بالفعل. على الرغم من أن القياسات لم تكن كافية في العام 1984 للحكم على وجود الجرم المقترح، تحسنت المشاهدات الرصدية بقدر ملحوظ منذ ذلك الزمن. ولكان من المفترض أن يكتشف مسح مستكشف الأشعة تحت الحمراء عريض المجال Wide-Field Infrared Survey Explorer- الذي أطلقته ناسا في العام 2009 وجمع بيانات ذات صلة حتى فبراير 2011- هذا النجمَ من نوع القزم الأحمر لو أنه كان موجوداً– ولكنه لم يلتقطه. كذلك، ولما يرصد المسح الكوكب الغازي العملاق المقترح بحجم المشتري أيضاً، دحضت أرصاد الأشعة تحت الحمراء أيضاً تفسيراً مقترحاً مماثلاً آخر يستند إلى وجود كوكب جديد افتراضي، سماه صاحب الفكرة بالكوكب إكس Planet X.

محفزات مقترحة من الحركة المجرِّية

في ضوء هذه الأفكار الفاشلة، بدت عدة اقتراحات مختلفة تستند إلى حركة المجموعة الشمسية عبر العناصر المعروفة في المجرة كبدائل واعدة. لم تقدم هذه الاقتراحات أشياء جديدة وغريبة، ولكنها اقترحت عوضاً عن ذلك أن تباينات الكثافة الفعلية في المجموعة الشمسية عند مرورها عبر الأذرع الحلزونية المجرية Galactic spiral arms أو عند عبور المستوى المجري Galactic plane قد تؤدي إلى تباين في معدل اضطراب Perturbation rate سحابة أوورت. يمكن لأحداث المرور المتكررة هذه في مناطق عالية الكثافة من حيث المبدأ أن تعلل هطل المذنبات.

تذكَّرْ أن درب التبانة هي عبارة عن مجرة قرصية Disk galaxy، بمعنى أن معظم الغاز والنجوم تقع ضمن قرص رفيع، بعرض نحو 130 ألف سنة ضوئية، ولكن فقط بسماكة نحو ألفي سنة ضوئية. تقع الشمس على بُعد 27 ألف سنة ضوئية تقريبا من مركز المجرة، وعند هذه اللحظة تكون قريبة من المستوى الأوسط للمجرة Galactic midplane– على بعد أقل من 100 سنة ضوئية. كما أنها تقع على حافة ذراع حلزونية.

تمتد الأذرع الحلزونية لمجرة درب التبانة من مركز المجرة في الاتجاه الشعاعي أثناء التفافها (انظر: الشكل 33). تحتوي هذه الأذرع الحلزونية على غاز وغبار أكثر من المناطق في الوسط، ومن ثم فهي مناطق يُرجح أن تتشكل فيها النجوم الفتية أكثر من غيرها. كما أنها موقع يتعزز فيه تركيز سحب جزيئية عملاقة– التركيزات الهائلة من الغاز الجزيئي الذي سبق ذكرها. عندما تعبر الشمس هذه المناطق الأكثر كثافة، تُلقي السحب الجزيئية قوى جذب أكبر يمكنها من حيث المبدأ أن تسبب اضطرابات شديدة ومن ثم التحفيز الدوري للاصطدامات.

وإحدى المشكلات المحتملة في هذا الاقتراح هي أن الأذرع الحلزونية ليست متناظرة تناظراً تاماً، وليس لها معدل دوران ثابت بالنسبة إلى الشمس. ومن ثم قد لا تعبرها الشمس بمعدل دوري دقيق. ولما كنا حالياً لا نفهم بنية الأذرع الحلزونية وكينماتيكا (معدل الحركة) Kinematics وتطورها إلا فهماً سطحياً، قد يكون استبعاد خيار الأذرع الحلزونية على هذا الأساس وحده سابقاً لأوانه. لكن، إلى حين إثبات خاصية الدورية أثباتاً أفضل، فإن هذا الافتقار إلى الانتظام المثالي في التنبؤات لا يستبعد بالضرورة توافقاً مع البيانات، وهو التوافق الذي قد يتبين أنه يعكس تواتراً دورياً تقريبياً أيضاً.



[الشكل 33] الأذرع الحلزونية لدرب التبانة وموقع الشمس (الحجم غير دقيق).

لكنَّ هناك عاملين آخرين يجعلان من تفسير الأذرع الحلزونية تفسيراً ضعيفاً لأي تعزيز ملاحَظ في معدل الاصطدامات. الأول هو أن متوسط كثافة الغاز في الأذرع الحلزونية غير مرتفع بما يكفي ليعلل التحفيز الدوري. وإذا لم تتغير الكثافة بما يكفي، فسيكون أي تحفيز دوري في أثناء عبور الأذرع الحلزونية أصغر من أن يمكن رصده.

المشكلة الأخرى هي أن المجموعة الشمسية لا تعبر الأذرع الحلزونية للمجرة بنحو متكرر جداً. هناك أربع أذرع حلزونية فقط وربما اثنان أصغر والسنة المجرية طويلة جداً، لذا حدثت أربعة اجتيازات للأذرع الحلزونية خلال الـ 250 مليون سنة الماضية. في الواقع، لأن الأذرع تتحرك بالاتجاه نفسه مع المجموعة الشمسية (وإن كان بسرعات مختلفة)، ربما تكون الفترة بين الاجتيازات نحو 150-80 مليون سنة– وهي بذلك نادرة جداً لأن تفسر سجل الانقراضات أو الفوهات الصدمية.

لكن فشل الأذرع الحلزونية في شرح المدة والتحفيز الدوري لا يستبعد احتمال دور التباين العمودي Vertical variations في الكثافة كمحفز محتمل للاصطدام، وقد يثبت هذا الاقتراح أنه الأكثر احتمالاً. بتراكبها

Superimposed على حركتها الدائرية تتذبذب المجموعة الشمسية بالاتجاه العمودي الذي تقطع فيه مسافة أصغر (مقارنةً بشعاع طوله 26 ألف سنة ضوئية عندما تكون الشمس عند هذا المستوى Sun is located along the plane)، كما يتضح في الشكل 34. ولأنها تدور حول المجرة في مدار دائري تقريباً، لتستغرق نحو 240 مليون سنة، كي تكمل دورة فيما يُعرف بالسنة المجرية Galactic year، ترتج الشمس قليلاً صعوداً ونزولاً. تعتمد سعة التذبذب Oscillation amplitude الأصغر هذه في الاتجاه العمودي للشمس على توزع المادة في القرص، ولكن التقدير المنطقي يصل إلى نحو 200 سنة ضوئية –على الرغم من أننا حالياً أقرب إلى المستوى الأوسط للمجرة أكثر منا إلى الارتفاع الأقصى، ربما على بُعد 65 سنة ضوئية.

يمكن لهذه الحركة الاهتزازية العمودية للمجموعة الشمسية أن تعلل التباين في التأثيرات المدية مع الزمن، ومن ثم تشرح أي تأثير دوري ضمن المقياس الزمني Time scale المناسب. لأن كثافة الغبار والغاز تتغير في أثناء حركة المجموعة الشمسية نحو الداخل وإلى الخارج من منطقة أكثر كثافة نوعاً ما في المستوى الأوسط للمجرة، إذ تتعرض المجموعة الشمسية لبيئات مختلفة في أثناء عبورها المنطقةَ. إذا ازدادت الكثافة زيادة هائلة في أثناء عبور المجموعة الشمسية للمستوى، كذلك ستزداد الاضطرابات، ومن ثم من المحتمل أن يزداد معدل اصطدام المذنبات بالأرض في هذه الأوقات. ولأن المد المجري هو مثير الاضطراب السائد في سحابة أوورت، من المحتمل أن يكون لاختلافات الكثافة بالاتجاه العمودي ضمن المستوى المجري تأثيرٌ قوي بما يكفي. أسبغ الأستاذان في جامعة نيويورك مايكل رامبينو Michael Rampino وبروس هاغرتي Bruce Haggerty، اللذان قدَّما هذا الاقتراح، اسماً رناناً أيضاً– فرضية شيفا Shiva hypothesis– على اسم الإله الهندوسي الذي يرمز إلى الدمار ثم إعادة البعث.

ولمطابقة الملاحظات الرصدية مع هذا السيناريو يستلزم الأمر أن يمتاز توزيع المادة في المجرة بسمتين اثنتين. أولاً يجب أن توفر كثافة المستوى الأوسط للمجرة طاقة جاذبية كامنة Gravitational potential لكي تعلل مدة التذبذب الصحيحة في الاتجاه العمودي. هذا الشرط مستقل تماماً على أي آلية اضطراب محددة. إذا لم تعبر المجموعة الشمسية المستوى بالمعدل الصحيح، فلن يتوافق التحفيز في هذه الأوقات مع البيانات.

السمة الثانية هي السمة الضرورية لتحقيق التغير في المعدل الذي يمكنه أن يعلل هطل المذنبات الدوري– أي اختلاف ملحوظ في الكثافة يمكنه أن يؤدي إلى تأثير يعتمد على الزمن يؤثر في سحابة أوورت في أثناء مرورها بالمستوى المجري. ولهاتين السمتين دور في أي اقتراح لتعزيز الكثافة عند المستوى الأوسط للمجرة. إنهما تستبعدان الاقتراحات التي نُوقشت هنا– وكما سأشرح لاحقاً– تبرران لمَ قد يكون قرص المادة المعتمة، الأكثر كثافة ورقّة من قرص المادة العادية، البديلَ الأنسب.

لكن في العام 1984، حاول رامبينو وستوذرز Stothers، بالاعتماد على تركيب أكثر معيارية لمجرة درب التبانة، تفسيرَ الاختلافات المطلوبة في الكثافة باستخدام السحب الجزيئية الضخمة– التي تكون أكثر كثافة بالقرب من المستوى الأوسط للمجرة. كان تفسيرهما مشابهاً لذلك المستخدم في اقتراح عبور الأذرع الحلزونية– يزداد تركيز المادة عندما تمر المجموعة الشمسية عبر السحب. لكن ما لبث هذا الاقتراح أن نُقض في السنة التالية عندما أظهر الفلكيون أن الطبقة السحابية كبيرة جداً– تمتد تقريباً قدر امتداد سعة التذبذب العمودي للشمس، لذلك سيكون الاختلاف على طول مسار الشمس أصغر من أن يُرصَد. من دون مادة إضافية، ستكون المواجهات مع السحب الجزيئية بأي حال من الأحوال نادرة بحيث لا يمكنها تفسير خاصية دورية تتكرر كل 30 مليون سنة.

هناك احتمال بديل استكشفته جوليا هيسلر وسكوت تريماين– هذه المرة بالعمل مع عالم الفيزياء الفلكية تشارلز آلكوك Charles Alcock. فبعد أن أثبتوا أهمية التأثير المدي من مجرة درب التبانة، أشاروا إلى أنه على الرغم من أن هذا التأثير وحده يتنبأ بمعدل مذنبات منتظم نوعاً ما، غيرَ أن وكزة من نجم قريب لها القدرة على أن تُسبب هطل مذنبات. ويغدو السؤال عندها هو: ما مدى تواتر حدوث هذه المواجهات؟ وما تأثيرها؟ وما مقدار التباين المتوقَّع في معدل ضرب المذنبات للأرض؟

قدر الفريق المعدل المتوقَّع من خلال السؤال عن مدى تواتر مرور نجم بكتلة شمسية (الكتلة الدنيا الضرورية لتحفيز الاصطدام اللازم عند الانتقال بسرعة 40 كم/ث) ضمن مجال 25 ألف وحدة فلكية من جرم في سحابة أوورت (المسافة الدنيا اللازمة لإثارة اضطرابه، لأنها مماثلة للمسافة بين سحابة أوورت والشمس). فتبين أنه من المتوقع حصول مثل هذه المواجهة مرة كل 70 مليون سنة. وهذا ليس متواتراً بما يكفي ليعلل الخاصية الدورية المقترحة، ولكنه قد يعلِّل من حيث المبدأ بعض الأحداث المماثلة خلال الـ 250 مليون سنة الماضية.

أجرت هيسلر وشريكاها تالياً مزيداً من المحاكاة الرقمية الموسعة للوصول إلى تنبؤات أفضل – آخذين بعين الاعتبار الدفعة الإضافية التي قد تقدمها القوى المدية. فوجدوا أن النجوم يجب أن تكون أقرب بقليل من الشمس مما اعتقدوه من قبل. لذلك فإن المعدل الحقيقي للهطولات المتوقعة أصغر– تقريباً مرة كل 100 مليون سنة، أو حتى 150 مليون سنة – وهو أقل بكثير من أن يعلل الخاصية الدورية التي ربما رصدتها البيانات. وَجدت تحليلات رقمية تالية أكثر تفصيلاً أن دور التفاعلات النجمية في إثارة الاصطدام أكبر مما وجدوه، ولكنها مع ذلك كانت غير كافية لتفسير البيانات.

كانت خلاصة كل هذا البحث هي أنه من دون وجود مكونات جديدة، لا تتغير جاذبية المجموعة الشمسية تغيراً كبيراً بما يكفي خلال إطار زمني قصير ليثمر تبايناً قابلاً للملاحظة في الضربات النيزكية، بحيث يعرض فيها المعدل عبر فترات منتظمة زيادة ملحوظة أعلى من معدل الخلفية. على الرغم من أن المجموعة الشمسية تعبر المستوى الأوسط للمجرة بتواتر منتظم، لا يزداد هطل المذنبات بنحو خاص نتيجة توزيع تقليدي للمادة في هذه الأوقات.

لذلك من منظور عام وواسع، يتبين أن الوضع يذكرنا بالأذرع الحلزونية. فالفترة المتوقعة قصيرة جداً، ولم يكن التغير في الكثافة كبيراً بما يكفي لإحداث فوضى دورية قابلة للقياس من النوع الذي كان مقدمو الاقتراح يأملون في تفسيره. اقترحت قياسات الكثافة الأولية خلاف ذلك، ولكن الحسابات اللاحقة- مع الأخذ في الاعتبار مزيداً من البيانات الحديثة حول المجرة أظهرت أن الاقتراحات التي سبقت عملنا- لم تثمر التردد الصحيح أو التحفيز الدوري المناسب ليتوافق مع سجل الفوهات. يستبعد تنبؤ الفترات الطويلة جداً معظم اقتراحات المستوى المجري ما لم يكن هناك عنصر جديد من المادة غير مكتشَف بعد في القرص.

بجمع أفضل القياسات المتاحة معا– والتي، مثل الدليل على الخاصية الدورية نفسه، تغيرت كثيراً مع الزمن– استنتجنا مات ريس وأنا في النهاية أنه من دون مكون من مادة غير مكتشفَة بعد في القرص، فإن فترة التذبذب العمودي أطول من أن تعلل البيانات التي تقترح الخاصية الدورية. لم يكن توزّع البيانات سلساً بما يكفي لأن يولد تغيراً فجائياً في معدل فوهات الاصطدام فحسب، بل أيضا إذا كان قرص درب التبانة المألوف يتألف فقط من المادة العادية، فهو أكثر تخلخلاً من أن يعطي القيمة الدورية الصحيحة.

على الرغم من أنها ليست كافية بحد ذاتها لتفسر أي خاصية دورية محتملة، فإن الاقتراحات المذكورة أعلاه علمتني أنا ومات الأساسيات الضرورية لكي نتابع بحثنا. فقد تعلمنا أن التأثيرات المدية تصنع اضطرابات كافية لتدفع المذنبات إلى النطاق الداخلي من المجموعة الشمسية في أثناء عبور القرص وبالقرب منه. ولكننا تعلمنا أيضاً أن المصادر المادية الفلكية المعروفة لا تصنع التأثير الدوري المأمول. لا يولد أي منها تأثيراً مدياً سريعاً بما يكفي ليفسر تحفيز المذنبات التي تصل إلى الأرض.

يتركنا هذا مع احتمالين. ولعل الأكثر احتمالاً هو أن الخاصية الدورية المرصودة ليست تأثيراً حقيقياً. ففي المقام الأول ليس الدليل قوياً جداً، كما أن من الأحداث قد تجتمع لتعطي مظهر تأثير دوري. والاحتمال الثاني، وهو تخميني، ولكنه الأكثر إثارة، وهو أن بنية المجرة مختلفة عما هو شائع افتراضه، وفي هذه الحالة قد يكون التأثير المدي أكبر وأكثر تنوعاً مما هو متوقع. وهذا هو المسار الذي قررنا أن نستكشفه. وقد آتى أُكله.

كما سيشرح الجزء التالي من الكتاب، عندما فسرنا أنا ومات ريس ما هو معروف عن كثافة المادة العادية في مستوى درب التبانة وسرعة الشمس وموقعها المَقيس، وجدنا أن التوافق مع سجل الفوهات كان

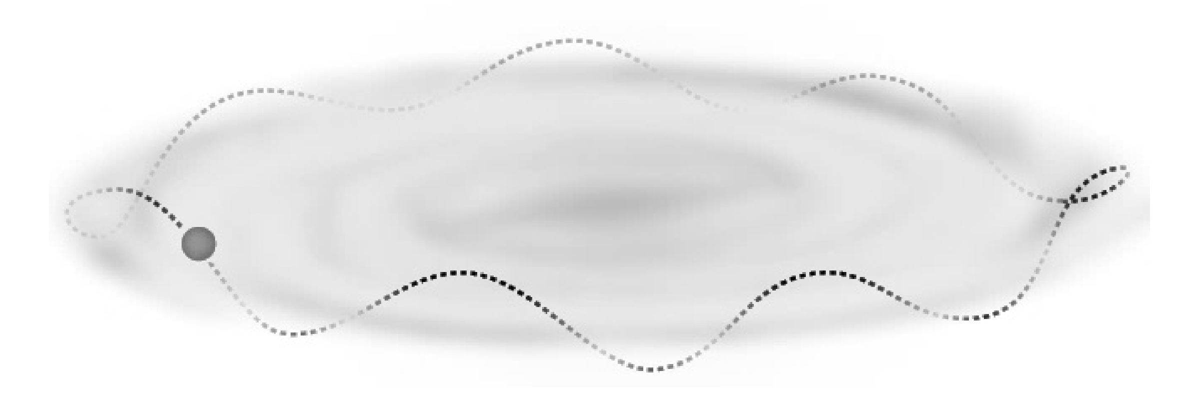
أفضل- عند مقارنته بنموذجنا المقترح عن المادة المعتمة. فقرص من المادة المعتمة في مستوى درب التبانة بالكثافة والسماكة المناسبين قد يُعدّل الحجم المتنبَّأ به والتبعية الزمنية للقوة المدية للمستوى المجري بحيث تتوافق فترة الاصطدام ودفعة البدء مع البيانات توافقاً معقولاً.

وكمكافأة لطيفة، بهذه الطريقة من التفكير، أصبح تأثير "البحث في مكان آخر" المذكور في الفصل السابق أقل خطراً مما كان يُعتقَد سابقاً. لم يعد يتعين علينا أن نفكر في معظم الفترات المحتملة- بل فقط تلك التي تأخذ في الاعتبار كثافة المادة العادية المَقيسة في المجرة. متسلحين بالقياسات غير الدقيقة -المعترف بعدم دقتها- للمجموعة الشمسية ونموذج مناسب من قرص المادة المعتمة، يمكننا أن نقيد نطاق فترات التذبذب المحتملة لتكون فقط تلك التنبؤات المتوافقة مع قياسات كثافة قرص درب التبانة الفعلية. وقد وجدتُ أنا ومات أنه عند أخذ البيانات الحالية بعين الاعتبار، فإن افتراض خاصية دورية أقوى بثلاثة أضعاف من احتمال الضربات العشوائية. وعلى الرغم من عدم وجود أدلة إحصائية قوية بما فيه الكفاية لإثبات وجود قرص المادة المعتمة الذي اقترحناه، كانت النتائج واعدةً بما يكفي لتستحق مزيداً من الدراسة.

أفضل جزء في هذا النهج هو أن معرفتنا بطاقة الجاذبية الكامنة للمجرة هي في تطور مستمر. وستزداد الثقة بمنهجنا، الذي يأخذ معظم المعلومات المتوافرة عن المجرة بعين الاعتبار، مع جمع مزيد من البيانات الدقيقة حول المجرة وحركة الشمس. يقيس العلماء حاليا توزيع المادة في المجرة. وتسجل أرصاد الأقمار الاصطناعية مواضع النجوم وسرعاتها، مما يساعدنا على استنباط طاقة الجاذبية الكامنة التي تَخبرها- أي القوة الكامنة التي تربطها بمجرة درب التبانة. وهذا بدوره سيخبرنا أكثر عن بنية المستوى المجري.

في ما يَعد بأن يكون نتائج مثيرة بحق، ستربط النظرية والقياسات حركة المجموعة الشمسية مع البيانات هنا على الأرض. وسيقود مزيد من البيانات إلى تنبؤات أكثر موثوقية، وهذه ستقودنا بدورها إلى نتائج أكثر موثوقية.

يعود الجزء التالي من الكتاب إلى نماذج المادة المعتمة، ويختم بنموذج معين يمكنه أن يفسر الخاصية الدورية في سجل الفوهات. إن دراسة الخاصية الدورية وتاريخ الأرض هي تبرير ممتاز لاستكشاف محيطنا المرئي المباشر والعالم الأثيري للمادة المعتمة، مما يتيح لنا أن ندرس الإمكانات المدهشة لما قد يكون موجوداً ويملأ كوننا من دون أن نراه.



[الشكل 34] في أثناء دورانها حول المجرة، تتأرجح الشمس صعوداً وهبوطاً عبر مستوى مجرة درب التبانة. في أثناء عبور مستوى المجرة، تواجه قوى مدية جاذبيةً أكبر. لاحظ أنه عُمد إلى تقصير فترة التذبذب في الصورة من أجل الوضوح، وأن الشمس ستهتز ما بين ثلاث وأربع اهتزازات فقط في أثناء دورانها.

القسم الثالث

فك شيفرة
هوية المادة المعتمة

إن التطورات في النظريات والملاحظات الرصدية في القرن العشرين سواء من علم الفلك أوالفيزياء أوالكوزمولوجيا قد علمتنا قدرا لا يصدق. ولكن الكون يحتوي على كم هائل من الأشياء التي لم نرها – ومن المحتمل أننا لن نراها أبداً. وهناك عوامل مختلفة تُفسِّر محدودية رؤيتنا. فالكثير من الأجرام أبعد من أن نستطيع رصدها. وأي شيء بعيد جداً لن يرسل أو يبعث ما يكفي من الضوء بالضرورة لنتمكن من التعرف إليه، بما أن أي ضوء قد يرسله سيتبدد عبر المساحة الشاسعة ويغدو معتماً.

إضافة إلى ذلك، قد يحجب الغبار والأجرام السماوية مجال رؤيتنا أو يغشي نظرنا. على الرغم من أن إرسال المسابير الفضائية إلى المناطق البعيدة قد ساعدتنا على التغلب على العقبات، إلا أن أي منها لم ينجح في الوصول إلى أقرب نجم – ناهيك عن أقرب مجرة. وبمداها المحدود ودقة ميزها Resolution المنخفضة، فإن المسابير المباشرة Direct probe لا تتيح إلا قدرا محدودا فقط من البيانات بأفضل الحالات.

وهناك المزيد من العوامل التي تقيد ما قد نراه. حتى وإن كان في جوارنا المباشر، مثلا قد يكون شيء ما أصغر من أن نتمكن من رصده. فمعالجاتنا البصرية مُقيّدة بما نستطيع أن نراه من دون تدخل التكنولوجيا. ولأننا نرى بأطوال الموجات المرئية، فإن أي شيء أصغر من طول موجة الضوء المرئي يفوق قدرتنا على اكتشافه بالعين المجردة. ومع أحدث التطورات – مصادم الهادرونات الكبير في جنيف هو أحدث ما توصلت إليه التكنولوجيا– يمكننا الآن رصد العمليات الفيزيائية بأحجام أصغر بكثير مما مضى. ولكن حتى تلك الألة الهائلة تكشف المادة وصولا إلى واحد من عشرة ملايين أو عشرة ترليونات من الميليمتر. ومن دون المزيد من التطور التكنولوجي، ستبقى الأحجام والقوى الفاعلة في الأبعاد الأصغر خارج نطاق قدرتنا على الرصد.

ولكن في حالة المادة المعتمة، فلدينا عذر أكبر لعدم رؤيتنا لها. المادة المعتمة لا تبعث ضوءا ولا تمتصه، وهو أمر ضروري للرؤية البشرية. وتتفاعل المادة المعتمة عن طريق الجاذبية، ولا يمكننا -على حد علمنا- إدارك وجودها بأي طريقة أخرى. نحن نعلم بوجودها للأسباب التي وضحناها في الفصل الثاني، ونحن نعرف بعض السمات الإجمالية لخصائصها، ولكننا لا نعرف بعد ما المادة المعتمة. وهذا ما يجعلها موضوعا مثيرا للبحث.

ونظرا لهدفنا النهائي في ربط المادة المعتمة بالمذنبات، لنعد الآن في هذا الفصل من دراسة المجموعة الشمسية إلى دراسة موضوع المادة المعتمة، ونستعرض بعض الاحتمالات الأساسية لما يمكن أن تكونه المادة المعتمة.

تطوير نموذج

على الرغم من أننا واثقون من وجودها، نحن لا نعلم بعد ما المادة المعتمة حقاً. نحن نعرف متوسط كثافة طاقة المادة المعتمة في الكون (من الخلفية الميكروية Microwave background)، وكثافتها في الجوار (من سرعات دوران النجوم في المجرة)، ونعلم أنها "باردة" Cold– بمعنى أنها تنتقل بسرعة تعادل جزءا صغيرا فقط من سرعة الضوء (لأننا نرصد بالفعل وجود بنية Structure على النطاقات الصغيرة في الكون)، وأنها تتفاعل في الغالب تفاعلات ضعيفة جداً – سواء مع المادة الاعتيادية أو مع نفسها (وذلك استدلالا من حقيقة عدم رصدها في الأبحاث رصدا مباشرا، ومن القياسات مثل قياسات عنقود الطلقة Bullet Cluster)، وأنها لا تحمل شحنة كهربائية.

ولكن هذا هو كل ما نعرفه تقريبا. حتى وإذا كانت المادة المعتمة تتألف من جسيمات أولية Elementary particle، فإننا لا نعرف كتلتها، أو ما إذا كانت تتفاعل بتفاعلات غير تفاعلات الجاذبية، أو كيف تولّدت في الكون المبكر. نحن نعرف متوسط كثافتها Average density، ولكن لا نعرف ما إذا كان هناك بروتون واحد في كل سنتيمتر المكعب في مجرتنا أو ألف ترليون ضعف كتلة البروتون منتشرة بكثافة أقل في الكون كله– لنقل لكل كيلومتر مكعب. فإن كلا من الأجسام الصغيرة العديدة أوالأجسام الأثقل والأقل كثافة قد تعطي متوسط كثافة المادة المعتمة نفسه، وهو مجمل ما قاسه معظم علماء الفلك.

سيراهن معظم علماء الفيزياء على أن المادة المعتمة تتألف من جسيمات أولية جديدة لا تتفاعل تفاعلات النموذج المعياري Standard Model الاعتيادية. إن معرفة ماهية جسيم ما تعني معرفة كتلته وتفاعلاته وما إذا كان ربما جزءا من قطاع أكبر من الجسيمات الجديدة. ولمعظم الفيزيائيين مرشحوهم المفضلون، ولكنني لن أستبعد أي اقتراح إلى أن يسبقني الرصد إليه.

وهناك سبب أقل تعنتا يؤدي دوراً في قصر رؤيتنا المحدودة مما يساعد على تحقيق تقدم نحو تحديد ماهية المادة المعتمة. الإغفال المحض أو نقص الانتباه قد يبقي الأشياء مخفية – حتى تلك التي قد تمتلك تقنياتنا الحالية القدرة على رصدها. فكثيراً ما نفشل في رؤية الأشياء التي لا نتوقعها. عندما جلست في "غرفة الطعام" في موقع تصوير مسلسل ذا بيغ بانغ ثيوري (نظرية الانفجار الكبير) The Big Bang theory، مسلسل تلفزيوني شهير تتألف شخصياته الرئيسية من علماء في الفيزياء، لاحظ بعض المشاهدين فقط وجودي – حتى أنا بالكاد لاحظت وجودي في المسلسل – على الرغم من أنني ظهرت بالقرب من الشخصية الرئيسية داخل إطار كاميرا التلفزيون بكاملي (انظر: الشكل 35).

لكن، يمكننا أن نصحح الإغفال. فبينما يستغل سحرة ألعاب الخفة نقطة الضعف هذه، يحاول العلماء التغلب عليها. هدفنا هو تحديد ما قد نغفل عنه بسبب نقص الانتباه. يحاول واضعو النماذج أمثالي تخيل ما يمكن أن يكون موجودا هناك ولم يحاول المجربون البحث عنه بعد، أو لم يدركوا أنه قد يكون في متناولهم. في نماذجنا نحاول أن نخمِّن ما قد يكمن وراء الظواهر التي نعرفها ويفسرها. وإذا أخذنا نماذج معينة بعين الاعتبار، يستطيع العلماء التجريبيون توجيه أبحاثهم وتحليلات البيانات لإثبات أو نفي أي اقتراح محدد. حتى المادة المُراوغة قد تتجلى بوضوح أمام النظر.



[الشكل 35] "ممثلة ثانوية" غير ملحوظة نسبياً في موقع تصوير "ذا بيغ بانغ ثيوري" (إهداء من جيم بارسون)

عادة ما أُسأل عن المعايير التي أطبقها عند محاولتي تطوير نموذج فيزياء الجسيمات. حتماً يجب أن يتأصل أي نموذج جيد في أفكار فيزيائية سليمة يمكنها أن توسع مدى النظريات الرياضية الموجودة حول المادة أو القوى أو الفضاء أو تستثمرها. ولكن ما المبادئ الموجهة لهذه القاعدة الأساسية؟

أحد المبادئ التي أفضلها أنا وزملائي هي أن تكون النماذج اقتصادية وتنبؤية قدر الإمكان. فنموذج به الكثير من القطع المتحركة لن يفسر أي شيء. والنموذج العام الذي يتناسب مع أي نتيجة محتملة ليس عِلماً. فقط النماذج التي تسمح لتنبؤات محددة بما يكفي لأن تُختبر وأن تتميز عما سواها من الأفكار قد تكون نماذج مثيرة للاهتمام.

الخاصية الأخرى المرغوبة – وإن كانت غير ضرورية – هي أن ترتبط مكوناتها بنماذج موجودة. مثال على ذلك مادةٌ معتمة مُرشّحة نجدها أصلا في النماذج المُقترحة كأساس للنموذج المعياري للمادة الاعتيادية. على الرغم من أن مثل هذه العلاقات غير مضمونة، إلا أنها علاقات واعدة من حيث أنها تتجنب الحاجة إلى تبنؤاتٍ إضافية عن قطاع جديد بالكامل من الجسيمات والقوى.

وأخيراً، والأكثر أهمية، يجب أن تكون النماذج متوافقة مع كل النتائج التجريبية والملاحظة الرصدية المعروفة. وأي تناقض وحيد يكفي لدحض النموذج. تنطبق هذه المعايير على معظم النماذج، بما فيها نموذج المادة المعتمة الأكثر شهرة الذي سأناقشه فيما يلي.

جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة WIMPs

جسيمات التفاعل الضعيف الضخمة (اختصارات: الجسيمات WIMPs) هي النموذج الفكري Paradigm للمادة المعتمة السائد بين أعضاء مجتمعات علم الفيزياء والفيزياء الفلكية لعدة عقود من الزمن. والجسيمات WIMPs هو اختصار لـ "الجسيمات ضعيفة التفاعل الضخمة" Weakly interacting massive particle. كلمة "ضعيفة" ليست للدلالة على ضعف قوتها النووية – يتفاعل معظم مرشحو الجسيمات WIMPs تفاعل أشد ضعفا من تفاعل نيوترينوات النموذج المعياري المتفاعلة بضعف. ولكن التفاعلات ضعيفة فعلاً، بمعنى أن المادة المعتمة لا تتناثر كثيراً (أو لا تتناثر على الإطلاق) أثناء عبورها في الكون Universe.

فضلاً عن ذلك، يمتلك مرشحو الجسيمات WIMPs كتلة تعادل المقياس الضعيف Weak scale، وهي عموما تعادل كتلة جسيم هيغز المكتشف حديثاً - قابل للرصد في ظروف الطاقة التي تستكشفها تجارب مصادم الهدرونات الكبير حالياً. للتوضيح، بوزون هيغز ليس مستقراً وله تفاعلات. وهو حتماً ليس ما تتألف منه المادة المعتمة. ولكن جسيمات أخرى بالكتلة نفسها تقريباً قد تكون موجودة كذلك. إذا كان ذلك صحيحاً، لن تكون المادة المعتمة أمام أعيننا فحسب، بل إن هويتها ستكون كذلك أيضاً – على الأقل بالنسبة لتجارب مصادم الهدرونات الكبير.

يستند دعم فرضية الجسيمات WIMPs على ملاحظة رصدية مدهشة قد تكون مصادفة أو قد تكون دليلاً على طبيعة المادة المعتمة. إذا وجد جسيم مستقر بكتلة تماثل كتلة بوزون هيغز المتكشف مؤخراً، ستكون كمية الطاقة التي تحملها هذه الجسيمات التي بقيت حتى اليوم في الكون مناسبة لتفسير الطاقة التي تحملها مادة الكون المعتمة.

والحسابات التي تبين أن جسيمات بمثل هذه الكتلة هي المرشح المناسب للمادة المعتمة تنبع من الملاحظة التالية: مع تطور الكون وتناقص درجة حرارته، ازداد انتشار الجسيمات الأثقل التي كانت وفيرة في الكون المبكر الساخن. وهذا لأنه مع انخفاض درجة الحرارة المفاجئ، فنيت الجسيمات الثقيلة بالتصادم مع ضديدات الجسيمات الثقيلة (الجسيمات المكافئة من حيث الكتلة والتي يمكن أن تفني الجسيمات بالتصادم معها) وبذلك اختفت كلتاهما، إلا أن العملية المعاكسة التي تولدهما لم تعد تحدث بمعدل كبير لأن الطاقة لم

تكن كافية لصنعها. كانت النتيجة أن تناقصت كثافة أعداد Number density الجسيمات الثقيلة مع انخفاض درجة حرارة الكون.

لو أن الجسيمات حافظت على توزيعها الحراري Thermal distribution– عدد الجسيمات الذي يجب أن يكون موجوداً في درجة حرارة معينة – مع هبوط الحرارة، لأفنت الجسيمات الثقيلة بعضها البعض. ولكن بسبب تناقص وفرة الجسيمات الثقيلة، تصبح الصورة أعلاه بسيطة جداً. من أجل إفناء بعضها بعضا، يجب أن تجد الجسيمات والجسيمات المضادة بعضها البعض. ولكن مع تناقص عددها وانتشارها، أصبح هذا الالتقاء أقل احتمالاً. نتيجة لذلك، تحللت الجسيمات بفعالية أقل مع ازدياد عمر الكون وبرودته.

كانت النتيجة أن بقيت حالياً جسيمات أكثر بكثير مما سيقترحه تمرين بسيط لتطبيق معادلات الديناميكا الحرارية Thermodynamics. في مرحلة ما أصبحت الجسيمات والجسيمات المضادة مُخفّفة جداً بحيث لم تتمكن من أن تجد وتفني بعضها البعض. يعتمد عدد الجسيمات الباقية على كتلة وتفاعلات المادة المعتمة المفترضة. ولعل الاستنتاج اللافت والمثير للاهتمام الناتج عن الحسابات المناسبة هي: أن الجسيمات المستقرة التي لها كتلة بوزون هيغز نفسه تقريباً -مصادفة- بالوفرة الصحيحة تقريباً لتكوِّن المادة المعتمة.

نحن لا نعلم بعد إن كانت الأرقام صحيحة. سنحتاج إلى معرفة خواص مفصلة للجسيم من أجل معرفة ذلك. ولكن التوافق المصادفة -وإن كان تقريبياً- بين الأرقام المرتبطة مع ما يبدو في الظاهر ظاهرتين مختلفتين تماماً هو أمر مثير للاهتمام، وربما يكون دلالة تبرر فيه فيزياءُ المقياس الضعيف Weak-scale physics وجودَ المادة المعتمة في الكون.

دعت هذه الملاحظة العديد من الفيزيائيين لأن يشكوا بأن المادة المعتمة تتألف فعلاً من الجسيمات WIMPs، كما يعرف هذا المرشح. تتمتع الجسيمات WIMPs بميزة أن بسبب ارتباطها بفيزياء النموذج المعياري، قابليتها للاختبار أسهل من غيرها من مرشحي المادة المعتمة. لا تتفاعل الجسيمات WIMPs للمادة المعتمة عن طريق الجاذبية فحسب. بل لديها تفاعلات غير جذبية صغيرة مع جسميات النموذج المعياري. حتى وإن كانت هذه التفاعلات صغيرة، يمكنها مع ذلك أن تكون كبيرة بما يكفي لتسجل تجربة حساسة تأثيرها فيما يدعى تجربة الاستشعار المباشر المشروحة في الفصل التالي.

ولكن أبحاث الجسيمات WIMPs باءت بالفشل. حسناً، هذا ليس صحيح تماماً. بين الفنية والأخرى تظهر بانتظام إشارات مُحيّرة على رصدها. ولكن لا أحد مقتنع بأن أي من هذه يمثل فعلاً اكتشاف المادة المعتمة، على عكس التذبذب الإحصائي Statistical fluctuation، فإن أي مشكلة في أداة الرصد، أو الفهم الخاطئ للخلفيات الفيزيائية الفلكية يمكنها أن تحاكي التأثير الذي نبحث عنه. ولا يزال الدليل غير مرضٍ تماماً بعد.

مع ذلك على الرغم من عدم رصدها، يحبذ الكثير من العلماء الفكرة، ولا يزالون يعتقدون أن التوافق بين مقاييس فيزياء الجسيمات والمادة المعتمة هو أدق من أن يكون عرضياً. كما لو أنه لا يكفي أن يكون هذا متفائلا بشكل مبالغ به، فإن هناك الكثيرون ممن يؤمنون بنموذج معين من الجسيمات WIMPs، مثل تلك المرتبطة بالتناظر الفائق Supersymmetry – نظرية تقترح أن لكل جسيم معروف هناك شريك فائق التناظر غير مكتشف بعد وهو بالكتلة نفسها والشحنة نفسها. ونظراً لعدم اكتشاف الجسميات فائقة التناظر أو الجسيمات WIMPs بعد، حتى بعض أكثر المؤيدين تعنتاً بدأوا بالاعتراف ببعض الشك.

أما أنا فأحاول أن أقيم الحالة كما هي في كل مرة من المرات. ففي حفلة زفاف حضرتها مؤخراً، كان القس فضوليا جدا حول الفيزياء وظل يسألني عن شعوري فيما يمكن أن تكونه المادة المعتمة. خذلته مراراً بقولي لندع الطبيعة تقرر ذلك. كصانعة نموذج، ما دام كان لدي إيمان أقل بالتناظر الفائق عند معالجة مسائل تتعلق بكتلة هيغز Higgs mass، حتى قبل نتائج مصادم الهدرونات الكبير الحديثة، لأنني أعرف حق المعرفة مدى صعوبة جعل معظم القطع تتلاءم مع بعضها بعضا. ما كنت لأستبعد التناظر الفائق ولا زلت لا استبعده

– فالتجارب موجودة لمثل هذا السبب – ولكن أيضاً ما كنت لأقول أنه صحيح حتماً أو أنه من المحتمل أن يكون كذلك.

بالمثل، أترك الخيارات مفتوحة أمام مرشحي المادة المعتمة. ما قلته للقس كان صحيحاً – ليس لدي مرشح مفضل. أحاول أن أطور نماذج قابلة للاختبار لأنها الطريقة الوحيدة التي سنعرف من خلالها الإجابة في نهاية الأمر. أما بالنسبة للتناظر الفائق، فاستمرار غياب الدعم التجريبي للجسيمات WIMPs يدفع الذين كانوا يؤيدون الجسيمات WIMPs بعناد أن يتشككوا بأنهم على الطريق الصحيح. حتماً من المنصف في غياب أي دعم تجريبي التفكير ببدائل واعدة. لا أعرف أي منها هو البديل الموجود في العالم – هذا إذا كان أيا منها ملائما على الإطلاق. ولكن لعل أحدى المصادفات الأخرى في الطبيعة تقدم دليلا أفضل.

المادة المعتمة اللامتناظرة

لأحد أكثر بدائل الجسيمات WIMPs للمادة المعتمة إثارة للاهتمام أسماءُ مختلفة في الأدبيات، ولكن من المتعارف الإشارة إليه بأنه المادة المعتمة اللامتناظرة Asymmetric dark matter. والنماذج التي تحتوي على مادة معتمة من هذا النمط تتناول توافقا مدهش آخر قد يكون مصادفة أو قد يوفر رؤية نافذة في طبيعة المادة المعتمة: كمية المادة المعتمة وكمية المادة العادية متماثلة بشكل مدهش.

أنا أدرك أنك عندما سمعت لأول مرة أن المادة المعتمة تحمل خمس أضعاف طاقة المادة العادية، ربما تكون قد استنتجت العكس – أن المادة المعتمة تتفوق على المادة العادية من حيث الطاقة التي تحملها. ولكن عند النظر إليهما عبر مدى من الاحتمالات، فإن كثافة طاقتيهما متماثلة بشكل مدهش. كان من الممكن أن تكون كمية المادة المعتمة أكثر بـ 700 ترليون ضعف، أو أقل بغوغول (10^{100}) ضعف من المادة العادية. بالطبع سيكون تطور الكون مختلفا تماما في أي من الحالتين. ولكن مع ذلك، فإن هذه النسب هي مجرد احتمالات أيضاً.

إلا أن الكون يحتوي تقريباً على كمية المادة العادية والمادة المعتمة نفسها. بعبارة أخرى، يمكنك أن ترى بسهولة كل شرائح الرسم البياني للفطيرة الكونية التي تصف الطاقة التي تحملها الطاقة المعتمة والمادة المعتمة والمادة العادية. ولا يمكنك اعتبار أي شريحة منها على أنها مجرد كِسرة أو الفطيرة بكاملها. جميعها شرائح، وإن كانت ستؤدي إلى زيادة متفاوتة في الوزن في حال كانت فطيرة حقيقية فعلاً. ومن دون سبب كامن، سيكون هذا مصادفة عجيبة.

من باب الإنصاف، ليس من المفاجئ أن تكون المساهمات التي نرصدها ذات حجم متماثل. إن كانت المساهمة صغيرة جداً لن يكون العنصر قابلاً للرصد. إلا أن الملاحظة المثيرة للاهتمام هي أن العديد من العناصر لها كثافة طاقة عالية بما يكفي لتساهم بكميات متماثلة في يومنا هذا. من حيث المبدأ يمكن أن تكون إحدى المساهمات أكبر بترليون ضعف من المساهمات الأخرى فلا ترصد المساهمات الأصغر. ولكن الحالة ليست كذلك. المادة المعتمة والمادة العادية لهما كثافة طاقة متماثلة بشكل مذهل.

في نماذج المادة المعتمة اللامتناظرة، التشابه في كثافة الطاقة بين المادة العادية والمادة المعتمة ليست مصادفة. إنه تبنؤ. تختلف الدقة التي تعالجها هذه النماذج عما يفترض أن تعالجه نماذج الجسيمات WIMPs التي تتعلق بكمية كثافة الطاقة المتبقية في المادة المعتمة بعد أن تحللت جزئياً. نحن لا نعلم أي من هذه المصادفات -إن صح أي منها- هي دليل حقيقي سيساعدنا علي تطوير فهمنا. ولكن كلا نوعي النماذج يستحق الدراسة، وقد يتبين أن يكون أحدهما صحيح.

في بداية تسعينات القرن العشرين، درس عدد مع العلماء، من بينهم ديفيد بي. كابلان David B. Kaplan، حالياً رئيس معهد النظرية النووية Institute for Nuclear Theory التابع لجامعة واشنطن في سياتل، هذا الاحتمال. وأُعيد إحياء هذه الفكرة لتعليل قياسات كونية حديثة أُجريت في أواخر العقد الأول من القرن العشرين على يد ديفيد كابلان آخر (الذي كان فيما سبق طالباً في واشنطن) مع الفيزيائي ماركوس لوتي Markus Luty والفيزيائية كاثرين زويك Kathryn Zurek. كما عمل الكثير من العلماء، من بينهم أنا، على هذا النموذج أيضاً.

إذاً ما هي الفكرة؟ لفهم السيناريو والدافع المُحفِّز لتطويره، لنقف قليلاً ونتأمل المادة العادية. كما أشرت في الفصل الثالث، المادة المعتمة التي لم يتم التعرف عليها ليست الشكل الوحيد المبهم للمادة. فالمادة العادية المألوفة مبهمة أيضاً – تحديداً: كميتها التي نجدها في الكون حاليا. تكمن طاقة معظم المادة العادية في البروتونات والنيوترونات، وهي نوع من الباريونات Baryon – مادة تتألف من جسيمات أولية تدعى كواركات Quarks. لو أن المادة العادية، التي تتألف في الغالب من باريونات، كانت موزعة بحسب أبسط سيناريو للكون المبكر Early Universe – فُنِيت مع انخفاض درجة حرارة الكون – لكانت كثافتها أقل بكثير مما نرصده حالياً.

هناك خاصية حساسة في كوننا – وفي أنفسنا – وهي أنه على عكس التوقعات الحرارية النموذجية، تبقى المادة العادية بكميات كافية لتوليد الحيوانات والمدن والنجوم. وهذا ممكن فقط لأن المادة تهيمن على ضديد المادة – أي هناك لاتناظر بين المادة وضديد المادة. لو كانت الكميات متساوية دائماً، لوجدت المادة وضديد المادة بعضها البعض، وأفنت بعضها، واختفت.

من الواضح أنه في زمن ما من تطور الكون، فاقت كمية المادة كمية ضديد المادة. من دون هذه الكمية الفائضة، لاختفت كمية كبيرة من المادة الآن. ولكننا لا نعلم بعد كيف حدث ذلك. حدث اللاتناظر بين المادة وضديد المادة فقط نتيجة تفاعلات وظروف خاصة فقط في الكون المبكر. لا بد أن عملية ما قد أخلَّت بقوانين التوازن الحراري Thermal equilibrium – كأن جرت العملية ببطء شديد لتُجاري توسع الكون – وإلا لوجدت جسيمات المادة وضديد المادة بأعداد متساوية. إضافة إلى ذلك، ليس بإمكاننا تطبيق التناظرات التي قد تبدو طبيعية عندما تتولد المادة الفائضة.

نحن لا نعلم ما الذي أدى إلى اختلال التناظر أو الإخلال بقوانين التوازن الحراري، على الرغم من وجود اقتراحات لتفسير الأمرين في النظريات الموحدة العظمى Grand Unified Theories، ونماذج اللبتونات (جسيمات كالإلكترونات والجزيئات المحايدة لا تتعرض لتفاعلات قوية)، والتناظر الفائق. لن يعرف أحد أي من هذه النماذج هو الصحيح إلى أن يعثر أحدهم على دليل رصدي. مع الأسف، العديد من هذه السيناريوهات ليس لها نتائج قابلة للرصد.

مع ذلك، يمكننا أن نكون على ثقة أنه في مرحلة ما، حدثت عملية تسمى نشأة الباريونات Baryogenesis، التي نشأ فيها فيض من المادة أكثر من ضديد المادة – أي لاتناظر بين المادة وضديد المادة. لولا نشأة الباريونات، لما كان أحد منا هنا الآن ليحكي هذه الحكاية.

تقترح نماذج المادة المعتمة اللامتناظرة أنه بما أن كثافة طاقة المادة المعتمة مشابهة لكثافة طاقة المادة العادية، ربما نشأت المادة المعتمة أيضاً في عملية مرتبطة تشتمل على تناظر بين المادة المعتمة وضديد المادة المعتمة. أنا وماثيو باكلي Matthew Buckley – الذي كان باحث ما بعد الدكتوراه في معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا Caltech عندما عملنا على هذا الموضوع – أطلقنا على هذه العملية مصطلح النشأة السينية Xogenesis، وعملنا على فكرة الكمية المجهولة للمادة المعتمة س X. الصفة الساحرة في أي من هذه النماذج أنها لا تسوغ فحسب نشوء المادة المعتمة بالطريقة نفسها لنشوء المادة العادية، بل إن الاثنتان مرتبطان في أكثر الأمثلة إثارة للاهتمام. إن كان هناك أي نوع من التفاعل بين المادة العادية والمادة المعتمة، حتى وإن كان تفاعلاً ضعيفاً وربما تفاعلاً كان أقوى في السابق، يجب أن تكون كثافة طاقة المادة العادية والمادة المعتمة

متشابهة، مما يتناول المصادفة التي نريد أن نشرحها. هذا أقوى دافع للاعتقاد بأن هذه النماذج قد تثبت أنها صحيحة.

الأكسيونات

إن نماذج الجسيمات WIMPs والمادة المعتمة اللامتناظرة هي نماذج فكرية عامة General paradigms. تتضمن نماذج الجسيمات WIMPs على جسيمات مستقرة المقياس الضعيف Weak-scale، في حين تقترح نماذج المادة المعتمة اللامتناظرة تبايناً تتفوق فيها المادة المعتمة على المادة المعتمة الضديدة. تحتوي الفكرتان على تنوع واسع من التطبيقات التي قد تتضمن تمييز الجسيمات والتفاعلات عن بعضهما البعض.

تتعامل نماذج الأكسيون مع سيناريو أكثر تقييداً. يظهر الأكسيون فقط في النماذج المرتبطة بموضوع محدد جداً في فيزياء الجسيمات يعرف بمشكلة خرق تناظر الشحنة السوية CP، حيث C تساوي الشحنة و P تمثل السويّة Parity. يقول قانون حفظ الشحنة C- أن تفاعلات الجسيمات سالبة وموجبة الشحنة مرتبطة بشكل وثيق. وتقول السويّة P- أنه يجب ألا تميز القوانين الفيزيائية بين اليمين واليسار بحيث، على سبيل المثال، يجب أن يكون هناك تفاعلات متطابقة بين الجسيمات التي تدور إلى اليمين وتلك التي تدور إلى اليسار. مع ذلك تفاعلات الطبيعة لا تخرق الشحنة والسويّة بشكل مستقل، إنما تخرق التركيبة معاً. بمعنى أن الاختراقات في الشحنة وفي السويّة لا تعوض Compensate بعضها بعضا.

ولكن لأسباب غير معروفة بعد، خرق تناظر الشحنة السويّة - كما تعرف تركيبة تناظرات الشحنة والسويّة - تحدث فقط في بعض العمليات. عدم القدرة على تفسير السبب الذي يجعل الانتهاك CP يقيد التفاعلات في بعض الحالات دون غيرها في بيئة النموذج المعياري تعرف بمشكلة سوية الشحنة القوية Strong CP problem. تُقدِّم الأكسيونات حلا مقترح لهذه المشكلة المحيرة.

أنا أذكر كل هذه الأشياء من أجل الفهم الكامل. فمن دون بعض الخلفية في فيزياء الجسيمات، أو حتى كتاب كامل عن الموضوع، أعلم أن هذه الأفكار صعبة الفهم. من حسن الحظ، لفهم دلالات الأكسيون الكونية ودوره كمرشح للمادة المعتمة، لست بحاجة لمتابعة تفاصيل فيزياء الجسيمات. تعتمد التنبؤات الكونية فقط على الأكسيون لكونه خفيف جدا وله تفاعلات ضعيفة جدا.

وقد تعتقد أن مثل هذه الصفات ستجعل الأكسيونات غير ضارة - في الواقع هذا ما ظنه معظم علماء الفيزياء في البداية. ولكن في دراسة رائعة، فسر علماء الجسيمات جون بريسكل John Preskill وفرانك ويلكزاك Frank Wilczek ومارك وايس Mark Wise لم ليست الحال كذلك بالضرورة. بيَّن هؤلاء المؤلفون أن الأكسيونات تتفاعل بضعف شديد وهي خفيفة لدرجة أن عدد الأكسيونات لن يؤثر في طاقة الكون المبكر. ولم تحدد أي عملية فيزيائية كميتها التي كان يجب أن تكون موجودة. فوجودها ما كان ليؤثر في تطور الكون إلى أن برد بشكل كاف.

بسبب عدم الترابط في كثافة الأكسيونات مبكرا، في الزمن الذي تصنع فيه الأكسيونات فرقاً أخيراً، من المحتمل أن عددها لن يكون ما سيفضله الكون - العدد الذي يقلل الطاقة، على سبيل المثال. لذلك سيجد الكون نفسه أمام عدد كبير من الأكسيونات بتكثف هائل - عدد كبير جداً حتى على الرغم من خفة الأكسيونات الشديدة ستكون طاقة تكثف الأكسيونات كبيرة. في تحول مفاجئ، نجد أن الأكسيونات لا تستطيع أن تتفاعل تفاعلا ضعيف جداً وإلا سيحتوي الكون على طاقة أكثر مما هو مسموح.

يقيد الاعتبار أعلاه النطاق المسموح من تفاعلات الأكسيون. ولكن بالنظر إلى هذه الملاحظة الرصدية من زاوية أخرى، إن كانت التفاعلات ضعيفة ولكن ليست ضعيفة جداً، قد يحمل الأكسيون كثافة طاقة كبيرة

– ليست بالضرورة كبيرة جداً بما يتناقض مع الملاحظات الرصدية. في الواقع، إن كانت قوة التفاعلات صحيحة تماماً، يمكن أن تتألف المادة المعتمة من الأكسيونات التي لها بالضبط كثافة طاقة المادة المعتمة المُقاسة.

كتلة الأكسيونات تختلف كثيراً عن أي من مرشحي المادة المعتمة التي سبق ذكرهما. بينما يتضمن الاقتراحان الآخران على جسيمات مادة معتمة بكتلة تقارب القياس الضعيف وربما أقل بمئة ضعف، يحتوي سيناريو الأكسيون على جسيمات فائقة الخفة، بكتل أصغر بنحو بليون ضعف على الأقل.

إضافة إلى ذلك، تتفاعل الأكسيونات بشكل مختلف تماماً عن مرشحي المادة المعتمة الآخرين. تضع تركيبة القيود الكونية والفيزيائية الفلكية نموذج الأكسيونات في إطار ضيق جداً من الكتل المسموحة وقوى التفاعل. لا يمكن أن تكون التفاعلات ضعيفة جداً وإلا ستكون كثافة طاقة الأكسيون كبيرة. ولكنها لا يمكن أن تكون قوية جداً أيضاً وإلا كنا سنرصد الأكسيونات رصدا مباشرا في تجارب الجسيمات أو في النجوم. ذلك لأن الأكسيونات التي تتفاعل بشكل قوي بما يكفي ستتكون في النجوم ومن ثم يمكن أن تساعد على تبريدها. لا يقدم المعدل الملحوظ لتبريد السوبرنوفا أي إشارة إلى مساهمة غير عادية، وبذلك يقيد القوة التي تتفاعل فيها الأكسيونات.

نظرياً، في ضوء القيود، أجد نموذج الأكسيونات شاذا بعض الشيء من حيث أن إطار التفاعلات المسموحة تجريبياً عشوائي جداً من دون أي علاقة واضحة مع العمليات الفيزيائية الأخرى. ولدي شك بأن التجارب التي تبحث عن الأكسيونات ستثمر عن نتائج إيجابية، ولكن الكثير من زملائي أكثر تفاؤلاً. تشتمل الأبحاث الجارية عن الأكسيون تفاعلها الضعيف جداً مع الضوء. وتبحث مستشعرات الأكسيون الموضوعة في حقول مغناطيسية ضخمة عن الإشعاع القابل للقياس الذي سيولده تفاعل الأكسيون مع الحقل المغناطيسي. الزمن فقط – ومثل هذه التجارب – كفيل بإخبارنا سواء كانت توجد الأكسيونات في الطبيعة أم لا، وإن كانت كذلك، إن كانت حقاً تؤلف المادة المعتمة.

النيوترونات

هناك صفة مشتركة بين كل النماذج التي ذكرتها وهي أنها تحتوي على نوع من العلاقة مع المادة العادية والمادة المعتمة – أشير إليها إما بمصادفة توافق قياسات الكتلة في الجسيمات WIMPs، أو بتقارب كثافة الطاقة في نماذج المادة المعتمة اللامتناظرة، أو بحل مقترح لمشكلة الشحنة السوية القوية CP في حال الأكسيونات. اقترح افتراض نماذج الأكسيون لسبب معين في فيزياء الجسيمات، ولكنها مع ذلك قد تكون المادة المعتمة. كذلك الجسيمات WIMPs تقدم كجزء من سيناريوهات فيزياء الجسيمات المقترحة، مثل التناظر الفائق. قد يقع نموذج المادة المعتمة اللامتناظرة ضمن إطار النظريات الموجودة، ولكن، على الرغم من التفاعلات بين المادة المعتمة والمادة العادية، عادة يكون مرشح المادة المعتمة اللامتناظرة إضافة عَرَضية إلى النظرية.

لكن، ربما تتفاعل المادة المعتمة – أو على الأقل بعض منها – تجاذبياً Gravitationally. بشكل محض. قد يكون للمادة المعتمة أيضاً شيء من قواها وتفاعلاتها الخاصة التي لا تتأثر بها مادتنا.

ولكن قبل اقتراح وجود قطاع مادة معتمة مستقل، درس الفيزيائيون ما إذا كان هناك أي نوع من المادة العادية التي يمكن أن تمتلك بحد ذاتها خواص تسمح لها أن تكون المادة المعتمة. كان السؤال إذا ما كان هناك أي شيء في النموذج المعياري أو أي شيء يتألف من جسيمات النموذج المعياري قد يكون ملائماً للمادة المعتمة، حتى من دون إدخال جسيمات إضافية.

أحد أولى هذه المقترحات كان يتعلق بنوع من الجسيمات الأولية يسمى نيوترينو Neutrino. في العملية المُشعَّة Radioactive process التي تعرف باسم اضمحلال Beta decay، تتحل النيوترونات إلى

بروتونات وإلكترونات ونيوترينوات (عملياً، إلى جسيماتها الضديدة، المعروفة بضديدات النيوترينوات Antineutrinos). النيوترينوات هي جسيمات- مثل الإلكترونات، ومثيلاتها الأثقل التي تعرف باسم ميونات Muons وتاوات Taus- لا تتأثر بالقوة النووية القوية Strong nuclear force. إلى جانب ذلك، تحمل شحنة كهربائية محايدة بحيث لا تتأثر بالكهرومغناطيسية بشكل مباشر أيضاً. من أهم خواص النيوترينوات هي أنها (فيما عدا الجاذبية، التي تتعرض لها كل الجسيمات- حتى وإن كان بمستوى ضئيل جداً) تتفاعل بشكل مباشر فقط من خلال القوة الضعيفة. والخاصية الأخرى هي أنها تعرف بأنها خفيفة جداً، على الأقل أخف من الإلكترون بمليون ضعف.

ولأنها تتفاعل بشكل ضعيف جداً، بدت النيوترينوات مرشحاً واعداً للمادة المعتمة. ولكن حتى الآن، سُحق الأمل لعدة أسباب. تتفاعل النيوترينوات في النموذج المعياري بالقوة النووية الضعيفة. ولكن لأي شيء خفيف بما يكفي وله تفاعلات قوة ضعيفة، لكانت تجارب الرصد المباشرة التي سنناقشها في الفصل التالي - التي لم تثمر عن شيء حتى الآن - قد رأت شيئاً. إضافة إلى ذلك، لا يمكن أن تكون النيوترينوات العادية التي نعلم بوجودها أن تكون هي المادة المعتمة لأن كثافة طاقتها منخفضة جداً. لكي تتوافق طاقة المادة المعتمة مع طاقة النيوترينوات، يجب أن تكون النيوتريونات أثقل بكثير.

في الـواقع، النـيوترينوات الخفيفة ستـكون شكلاً من المـادة المعتمة الساخنة Hot dark matter، التي تنتقل تقريباً بسرعة الضوء. ستمحو المادة المعتمة الساخنة البُنية Structure في النطاقات الأصغر من عنقود مجري هائل، ومع ذلك فنحن نرصد المجرات والعناقيد المجرية. لذا فإن مثل ذلك سيكون مشكلة.

إذاً فإن النيوترينوات غير فاعلة في بيئة النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات. فكر الفيزيائيون من ثم بإجراء تعديلات على النموذج المعياري ولكنها لم تنجح أيضاً. الجسيمات التي تتفاعل مثل النيوترينوات - حتى النسخة المعدلة من النيوترينوات - لا تؤدي إلى تشكل البُنية كما عرضناها في الفصل الخامس.

من حيث المبدأ، قد تكون المادة المعتمة الساخنة ممكنة لو لم تتشكل البنى الأصغر التي نعلم بوجودها مباشرة بل تشكلت من تفتت البنى الأكبر. ولكن هذا السيناريو ينجح من ناحية الأرقام ولكنه لا يتوافق مع المشاهدات الرصدية. لذا على الرغم من التلميح العرَضي بوجود نيوترينوات خفيفة، وظهور عناوين أخبار تتناول نيوترينوات المادة المعتمة، إلا أن النيترينوات في الحقيقة ليست المادة المعتمة. بأفضل الحالات يمكن أن تفسر النيوترينوات جزءاً ضئيلاً من كثافة المادة المعتمة الموجودة. لهذا يركز الفيزيائيون اهتمامهم على سيناريوهات المادة المعتمة الباردة Cold dark matter scenarios، التي تقترح مرشحي مادة معتمة أكثر بطئاً - والتي تكون أثقل عادة. ويستبعدون سيناريوهات المادة المعتمة الساخنة - السيناريوهات التي تحصل عليها عندما يكون لديك جسيمات خفيفة وسريعة من النيوترينوات.

ماتشوات

أخيراً، لنستعرض احتمال أكثر ترجيحاً -سطحيا- وهي أن المادة المعتمة لا تتألف من جسيمات أولية جديدة وإنما تتألف من بنى مجهرية لا تحترق Nonburning (ومن ثم لا تبعث الضوء)، وغير انعكاسية Nonreflective مصنوعة من أشياء عادية. لن نرى هذه العناصر لنفس سبب أننا لا نبصر في غرفة مظلمة. ليس لأن الأشياء من حولك لا تتفاعل مع الضوء في مستوى معين. إنما لأنه ليس هناك ضوء كاف من حولك لترى. قبل القبول بوجود المادة المعتمة -أي شخص سواء ميال إلى العلم أم لا- سيرغب بمعرفة لم هذه الإمكانية البديهية بظاهرها ليست صحيحة.

تعرف العناصر المعتمة كهذه بمصطلح ماتشوات MACHOs، وهو اختصار لعبارة Massive Compact halo object- جرم هالي مضغوط ثقيل، ودورها كبديل عن الجسيمات WIMPs هو السبب وراء

اسمها. بما أن الماتشوات لا تبعث الضوء أو القليل منه، فقد تبدو أنها مخفية ومعتمة حتى وإن كانت مصنوعة من المادة العادية. تتضمن قائمة مرشحي الماتشوات الثقوب السوداء Black holes والنجوم النترونية Neutron stars والأقزام البنية Brown dwarfs.

كما ذكرنا آنفاً، الثقوب السوداء هي حالة من المادة المرتبطة تجاذبياً بشكل محكم ولا تبعث أو تعكس الضوء. النجوم النيوترونية – محتمل أنها تنشأ عند انهيار سوبرنوفا – وهي بقايا نجوم هائلة ليس لديها مادة كافية لتصبح ثقوباً سوداء ولكنها تتكثف بدل ذلك إلى حالة لب نيوتروني شديد الكثافة. الأقزام البنية هي أجرام أكبر من المشتري وأصغر من النجوم، لذا لا يمكنها أن تحترق بالاشتعال النووي، ولكنها بدل ذلك تسخن بفعل انكماشها بفعل الجاذبية.

تبدو العناصر الفيزيائية الفلكية أعلاه احتمالات منطقية حتماً. ولكن حتى قبل أن تقيد مشاهدات حديثة هذه الاحتمال تقيدا حاد، نظر العلماء إلى الماتشوات على أنها غير مرجحة. قد تتذكر من الفصل الرابع أن أحد الاختبارات الأولى لسيناريو الانفجار الكبير (العظيم) Big Bang النموذجي هو تكوين نواة في الكون المبكر – المعروفة بالتوليد النووي البدئي Primordial nucleosynthesis. ولكن هذا السيناريو ينجح فقط في نطاقات معيّنة من قيم كثافة الطاقة للمادة العادية. تحتوي معظم نماذج الماتشوات على الكثير من المادة العادية لتثمر عن تبنؤات صحيحة لمقدار وفرة الأنوية Nuclei abundance. إضافة إلى ذلك، حتى وإن شكلت المادة العادية هذه العناصر، يفرض فهم كيف انتهى بهال الأمر في الهالة Halo وليس في القرص المجري Galactic disk تحدياً مهماً آخر.

مع ذلك، أبقى علماء الفيزياء الفلكية خياراتهم مفتوحة. المادة المعتمة اقتراح استثنائي لذلك تستحق أن نتأكد من استبعاد كل تفسير تقليدي. في تسعينات القرن العشرين، بحث علماء الفيزياء عن الماتشوات من خلال عملية تسمى "العدسة المجهرية" Microlensing. بحسب هذه الفكرة الجميلة والبارعة، تعبر الماتشوات المتحركة في الفضاء أمام نجم. لأن أشعة الضوء تنحني حول الماتشوات (أو أي جرم ضخم)، تصبح مثل عدسة يضخم تأثيرها التجاذبي في الضوء الصادر من النجم بشكل مؤقت، فيجعله يبدو أكثر توهجاً قبل أن يعود لحالته الطبيعية. طبعاً يجب أن يحدث هذا في مقياس زمني قصير بما يكفي لرصده ويجب أن يكون تأثير التغير في الحجم كبيرا بما يكفي ليتم التقاطه. ولكن أظهر علماء الفلك باستخدام هذه الطريقة أن الماتشوات التي تتراوح بين ثُلُث كتلة القمر وبين 100 ضعف كتلة الشمس لا يمكن أن يكون المادة المعتمة، وبذلك استبعدوا العديد من مرشحي الماتشوات.

على الرغم من أن أبحاث الماتشوات استبعدت النجوم النترونية والأقزام البيضاء White dwarfs، بقيت الثقوب السوداء الواقعة ضمن إطار كتلة ضيق احتمالاً ممكناً. فيما عدا الافتقار إلى الأسباب النظرية للاعتقاد بأن هناك كمية مناسبة من الثقوب السوداء تقع ضمن نطاق كتلة معين، مع ذلك فإن الاختلال التجاذبي Gravitational disruptions بفعل الثقوب السوداء وفترة وجود الثقوب السوداء تُشكّل قيودا أخرى. ذلك لأن الثقوب السوداء الصغيرة جداً ستكون قد اضمحلت باطلاقها للفوتونات من خلال ما يعرف بإشعاع هوكينغ Hawking radiation (سميت باسم الفيزيائي ستيفن هوكينغ، الذي كان أول من اقترحها)، في حين تلك الثقوب السوداء الكبيرة جداً سيكون لها تأثيرات قابلة للرصد لكننا لم نرصدها بعد. وتتضمن مثل هذه التأثيرات اختلال الأنظمة الثنائية Disruptions of binary systems، التشتت Scattering الذي يمكن أن يُسخِّن مستوى درب التبانة Plane of the Milky Way ويؤدي إلي تمدده، وكذلك مراكمة الثقوب السوداء للمادة الأخرى و تشتيتها بالإشعاع، وتأثير موجات الجاذبية Gravity waves المرتبطة بالثقوب السوداء المقاسة بدقة باستخدام زمن نبضات النجوم النباضة (البلسارات) Pulsar. عند جمع معظم القيود مع بعضها فإن كتلة الثقوب السوداء ستتراوح بين واحد على مليون من الكتلة القمرية وبين كتلة قمرية واحدة، ولكن تُستبعد الثقوب السوداء التي تقع خارج نطاق الكتلة هذا. كذلك قد تستبعد القياسات المعمقة لخواص النجوم النترونية هذا النطاق المتبقي والمحدود.

حتى وإن بقي إطار صغير جداً من الثقوب السوداء، فمن الصعب تخيل لم هذه الثقوب السوداء فقط في هذا النطاق المعين من الكتلة قد نشأت وبقيت بأعداد كافية. ومن العدل أن نفكر في هذه الاحتمال. ولكن بالاستناد إلى قيود التوليد النووي وبناء النماذج، فإن احتمال أن تكون الثقوب السوداء – وخاصة تلك التي تتألف من المادة العادية – هي المادة المعتمة هو احتمال بعيد.

ما العمل؟

تحتوي النماذج السابقة على مرشحي المادة المعتمة الأكثر حظا في النقاش– أي التي يعتبرها معظم علماء الفيزياء هي الاحتمالات المنطقية. ولكن حتماً هي ليست الخيارات الوحيدة. وإن كانت بعض هذه الأفكار واعدة حتى الآن، ولدينا سبب وجيه لنشكك بأي نموذج أو خاصية محددة إلى أن تثبت صحتها تجريبياً.

من ناحية أخرى، يمكننا أن نكون على ثقة كبيرة بوجود المادة المعتمة – حتى وإن كنا لا نعلم حتى الآن ما هي. هذا وقت مناسب حالياً لكل من النظريين والتجريبيين ليعيدوا التقييم ويدرسوا نطاقاً أكثر اكتمالاً من النتائج. سينخرط معظمهم في أنماطٍ متباينة من استراتيجيات البحث. وستكون النماذج البديلة مفيدة في تخطيط هذه الاستراتيجيات.

ولكن قبل تناول بعض الأفكار الأحدث، سأستعرض بعض تقنيات البحث الموجودة للبحث في المادة المعتمة لكي نقيم الحالة الحالية بمعرفة أكبر. سنجد أن وفرة البيانات في علم الفيزياء الفلكية مقرونة مع عدم رصد النماذج المقترحة سابقاً تمنح العلماء التجريبيين والمراقبين سبباً وجيهاً للبحث بعيداً عن أبحاث المادة المعتمة القديمة هذه والأكثر تطوراً.

كيف لنا أن نبصر في الظلام

في ديسمبر 2013 تحدَّث الأستاذ في جامعة براون Brown University ريتشارد غيتسكيل Richard Gaitskell، وهو باحث بارز ومتحدث مشارك في التجربة لَكْس LUX – تجربة ضخمة لرصد المادة المعتمة – في جامعة هارفارد، في الندوة المُقامة في قسم الفيزياء، ووصف بسرور كيف لم يكتشف هو وزملاؤه المادة المعتمة. كان مقياس نجاح تجربته- وياللغرابة- هو أنها استبعدت عديداً من ماهيات المادة المعتمة التي اقترحتها شريحة كبيرة من النماذج وبعض النتائج التجريبية الزائفة (كما اتضح لنا الآن). مع ذلك على الرغم من الأخبار الفيزيائية المخيبة للآمال التي تفيد بأن المادة المعتمة لم تُكتشَف بعد – سواء في تجربته أو تجربة أي أحد غيره– كان غيتسكيل مبتهجاً لأسباب مبرَّرة. لقد نجحت التجربة المثيرة للتحدي التي أعدَّها هو والآخرون، وعملت كما كان يرجو. ليس خطأه أن الطبيعة لم تتعاون وتُقدم مادة معتمة- مُرشَّحة- بكتلة وقوة تفاعل يمكن لتجربته أن تلتقطهما.

كانت هذه مجرد أول مجموعة نتائج تصدر من التجربة LUX، التي ما زالت جارية، وتتابع جمع مزيد من البيانات – مع ذلك تجاوزت نتائج التجارب الأقدم والأرسخ تجاوُزاً كاسحاً. أسس غيتسكيل وزملاؤه بيئة نظيفة بحيث كانت النتائج الأولى للتجربة موثوقاً بها بما يكفي لكي تحل محل النتائج الأقدم. وفي بيئة يمكن فيها لبصمة عالِم تجريبي مارق في غير موضعها أن تعطي "إشارة" أكبر بنحو بلايين أضعاف الإشارة الضعيفة لجسيمات المادة المعتمة، أبلت تجربة غيتسكيل بلاء حسناً. أثبتت البيانات النظيفة والموثوق بها التي جمعتها التجربة أن جهازه اضطلع تماماً بما هو مصمَّم لأجله– أبحاث عالية الحساسية ورفض موثوق به للإشارات المُضلِّلة.

حالياً يُجمَع كثير من البيانات بأحدث التقنيات، وليس جميعها عن تفضيلات المستهلك. والبيانات التي تُجمَع حالياً ستقود إلى تقدم في فيزياء الجسيمات وعلم الفلك والكوزمولوجيا- إضافةً إلى عديد من مجالات العلم الأخرى. وعلى الرغم من عدم نجاح التجارب في اكتشاف المادة المعتمة بنحو قاطع، قدم عديدٌ منها نتائج مُحيِّرة. فأحياناً تأتي تجربة مثل تجربة غيتسكيل، وتستبعد عديداً من الاحتمالات الواعدة التي اقترحتها تجارب سابقة ذات مقاييس أقل دقة. وتستمر تجربته وتجارب الآخرين في البحث على أمل أن يعثروا قريباً على إشارة أكثر رسوخاً والتي ستمثل اكتشافاً حقيقياً.

لكن البحث عن المادة المعتمة مهمة في غاية الصعوبة. لأن الجاذبية قوة ضعيفة، ويتعين على البحث عن الجسيمات التي تؤلف المادة المعتمة أن يُحفِّز تحديداً تلك التفاعلات التي لا نعرف بعد ما إذا كانت المادة المعتمة تتأثر بها. إذا كانت المادة المعتمة تتفاعل بالتجاذب وحده، أو بقوى لا تتأثر بها المادة العادية، فالأبحاث التقليدية عن المادة المعتمة لن تكتشفها أبداً. حتى إن كانت قوى النظام المعياري تؤثر في المادة المعتمة، فإننا لا نزال غير متأكدين بعد مما إذا كانت التفاعلات قوية بما يكفي لكي تلتقطها التجارب الحالية.

تعتمد أبحاث اليوم على الاعتقاد أن المادة المعتمة، على الرغم من عدم قدرتنا علي رؤيتها تقريباً، لها تفاعلات ملموسة بما يكفي لكي تلتقطها الكواشف المصنوعة من المادة العادية. يستند هذا جزئيا على التمني. ولكن التفاؤل متأصل أيضاً في نتائج النماذج WIMP التي ناقشناها في الفصل السابق. يجب أن يتفاعل معظم

مُرشّحي الجسيمات WIMP المصنوعة من المادة المعتمة مع جسيمات النموذج المعياري بعض الشيء- قد يكون المقدار ضئيلاً بالفعل، ولكن بمعدلات من المحتمل أن تكون قابلة للرصد في تجارب دقيقة جداً هي قيد العمل الآن. وقد وصلت الأبحاث حالياً إلى نقطة سيؤكَّد عندها أو يُنفَى معظم نماذج الجسيمات WIMP متى ما أعلنت هذه التجارب نتائجها النهائية.

عند دراسة نماذج المادة المعتمة البديلة في الفصول المقبلة، سأقدم بعض النتائج الرصدية المختلفة. ولكن هذا الفصل يركز على الجسيمات WIMP كمرشح للمادة المعتمة، والطرق الثلاث المفضلة للبحث عنها. (انظر: الشكل 36). إن المادة المعتمة مراوغة، ولكن العلماء التجريبيين كانوا جريئين في بحثهم عن نتائجها الدقيقة القابلة للرصد.



[الشكل 36] البحث عن الجسيمات WIMP يتبع طريقة ثلاثية المحاور. تبحث الكواشف تحت الأرضية عن المادة المعتمة التي تضرب النوى المستهدفة بشكل مباشر. وقد تجد التجارب في مصادم الهدرونات الكبير (اختصاراً: المصادم LHC) دليلاً على المادة المعتمة التي أنتجها المصادم LHC. كما تبحث الأقمار الاصطناعية والتلسكوبات في أبحاث الكشف غير المباشر عن دليل على المادة المعتمة التي تتحلل إلى مادة مرئية.

تجارب الكشف المباشر

تندرج المجموعة الأولى من تجارب البحث عن المادة المعتمة تحت فئة تجارب الكشف المباشر Direct detection. تتضمن تجارب الكشف المباشر أجهزةً ضخمة عالية الحساسية مقامة على الأرض، صُممت سَعةُ استكشافها الهائلة لتعوض عن قوة تفاعل المادة المعتمة الضئيلة (في أفضل حالاتها). الفكرة وراء هذه الأبحاث هي أن المادة المعتمة عليها أن تمر من خلال مادة الكاشف إلى أن تصطدم بنواة. سيولد هذا التفاعل كمية صغيرة من الحرارة المرتدة Recoil heat أو الطاقة Energy التي يمكن قياسها من حيث المبدأ إما بكاشف شديد البرودة أو بمادة عالية الحساسية مصمَّمة لامتصاص وتسجيل الحرارة الضئيلة التي يُخلِّفها التفاعل. إذا مر جسيم مادة معتمة خلال جهاز كشف مباشر واصطدم بنواة وارتد عنها بعد ارتطامه بها، قد تسجل التجربة تغيراً ضئيلاً في تغير الطاقة الذي سيكون الدليلَ المحتمل الوحيد القابل للقياس الذي يشير إلى مرور الجسيم. على الرغم من أن فرصة أي تفاعل وحيد صغيرة جداً، يتحسن احتمال النجاح مع الأحجام الأكبر والحساسية الأعلى، ولهذا السبب فإن هذا النوع من التجارب شديد الضخامة.

الكواشف فائقة التبريد Cryogenic detectors هي أجهزة باردة جداً، ولها ماصّات بلورية Crystal absorbers مثل الجرمانيوم. وهي تستجيب للكميات الصغيرة من الحرارة باستخدام الجهاز سكويد SQUID– اختصاراً لجهاز تداخل كمّي فائق التوصيل Superconducting quantum interference devices – مدمج داخل الكاشف. تبدد هذه الأجهزة الموصلية الفائقة وتسجل حادثة تولُّد مادة معتمة حتى إن ضرب مقدارٌ ضئيل من الطاقة المادةَ فائقة التوصيل شديدة البرودة في الجهاز. تتضمن تجارب هذه الفئة البحث عن المادة المعتمة فائقة البرودة Cryogenic Dark Matter Search (اختصاراً: البحث CDMS)، وبحث الحادث النادر للتبريد الفائق باستخدام مقياس حرارة فائق الموصلية Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Termometers (اختصاراً: البحث CRESST)، وتجربة التقاط الجسيمات WIMP في موقع تحت الأرض Expérience pour Détecter Les Wimps en Site Souterrain (اختصاراً: البحث EDELWEISS). الأسماء طويلة جداً، ولكن معظم علماء الفيزياء يستخدمون الاختصارات السهلة.

ليست الكواشف عالية البرودة هي النوعَ الوحيد من الكواشف المستخدمة في الكشف المباشر. يستخدم النمطُ الثاني– الذي يتسارع تزايد أهميته– السوائلَ النبيلة Noble liquids. حتى إن كانت المادة المعتمة لا تتفاعل بنحو مباشر مع الضوء، من المحتمل أن تُولِّد الطاقة المضافة إلى ذرة إكزينون أو آرغون- عندما يضربها جسيم مادة معتمة- وميضاً من الشرارة. يتضمن هذا النوع من التجاربِ التجاربَ المعتمدة على الإكزينون XENON100 والتجربة LUX (اختصاراً لكاشف الإكزينون الكبير تحت الأرض Large Underground Xenon Detector)– التجربة التي ذكرتها فيما سبق– إضافةً إلى الكواشف المعتمدة على الآرغون والتي تُسمى التجربة ZEPLIN والتجربة DEAP والتجربة WARP والتجربة DArkSide والتجربة ArDM.

في السنوات المقبلة ستحظى كل من التجربة XENON والتجربة LUX بتحسينات أكبر وأفضل– التجربة XENON1T والتعاون LUX-ZEPLIN. لإعطاء فكرة عن التحسينات، كان الرقم 100 في الاسم الأصلي XENON100 يمثل مقياساً تقريبياً للكيلوغرام في حين يمثل 1 "1T طن". أما LUX-ZEPLIN فسيكون أكبر حيث يصل الحجم الموثوقي Fiducial volume إلى 5 أطنان، وهي المنطقة المستخدمة لاكتشاف المادة المعتمة.

صُممت كل من الكواشف عالية البرودة وكواشف الغازات النبيلة لتسجِّل أيَّ طاقة ضئيلة قد يُخلِّفها جسيم مادة معتمة. لكن بقدر ما هو مذهل، فإن التقاط تغيُّر طفيف في الطاقة لن يكفي لإثبات مرور جسيم مادة معتمة عبر الكاشف. يتعين أن تثبت التجارب أيضاً أنها سجلت الإشارة المرجوة وليس إشعاعاً خلفياً فقط

الذي يمكن أيضاً أن يُخلِّف كميات ضئيلة من الطاقة قد تحاكي المادة المعتمة، كما أنه يتفاعل مع المادة العادية بقوة أكثر مما يمكنه مع المادة المعتمة.

هذا صعب. فالإشعاع، من منظور جهاز كشف المادة المعتمة الحساس، منتشرٌ في كل مكان. يمكن أن تضرب ميونات الأشعة الكونية Cosmic ray muons– جسيمات أثقل من الإلكترونات– الصخورَ وتُولِّد رذاذاً من الجسيمات، وكذلك بعض النيوترونات التي تشبه المادة المعتمة. حتى عند افتراض افتراضات تفاؤلية منطقية حول كتلة وقوة تفاعل جسيمات المادة المعتمة، تسود الأحداث الكهرومغناطيسية الخلفية على الإشارة بمُعامل يعادل ألف ضعف على الأقل. ولا يأخذ هذا التقدير بعين الاعتبار المواد الإشعاعية الأولية وتلك التي من صنع الإنسان، الموجودة في الهواء وفي البيئة وفي الكاشف.

يعرف العلماء الذين صمموا هذه الأجهزة هذا الأمر حق المعرفة. ولعل أهم جانبين بالنسبة إلى علماء الفيزياء الفلكية والباحثين التجريبيين في أبحاث المادة المظلمة هو "الحماية" Shielding و"التمييز" Discrimination. فلكي يحموا الكاشف من الإشعاع الخطير ويميِّزوا حوادث المادة المعتمة المحتملة من التبعثر الإشعاعي Radiation scattering غير المهم في الكاشف، يبحث العلماء التجريبيون عن المادة المعتمة في أعماق الأرض في المناجم أو تحت الجبال. في هذه الحالة يتعين أن تضرب الأشعة الكونية الصخور المحيطة بالكاشف المدفون في أعماق الأرض بمقدار كافٍ بدلا من أن تضرب الكاشف نفسه. سوف يُحجب معظم الإشعاع، في حين تصل المادة المعتمة، التي لها قوة تفاعل أضعف بكثير، إلى الكاشف من دون عراقيل.

من حسن الحظ يتوافر كثير من المناجم والأنفاق التي بُنيت لأهداف تجارية والتي يمكن استخدامها لمثل هذه التجارب. وتوجد مناجم أصلاً لأن العناصر الثقيلة– كما أشيرَ سابقاً- تغوص إلى مركز الأرض، ولكن جزءاً منها يصعد أحياناً كخامات تتراكم تحت سطح الأرض. تجري التجربة DAMA، وتجربة تدعى XENON10، والتجربة الأكبر XENON100، إضافةً إلى التجربة CRESST التي يستخدم الكاشف فيها التنغستين، في مختبر غران ساسو الوطني الواقع في نفق في إيطاليا تحت نحو 1,400 م تحت سطح الأرض.

في حين تجري التجربة LUX في كهف بعمق 1,500م تحت الأرض في منجم هومستيك في جنوب داكوتا، الذي بني أساساً للتنقيب عن الذهب. يشتهر منجم هومستيك في أوساط الفيزيائيين لكونه موقعاً لكشف مدهش آخر– كشف النيوترينوات الواردة من الشمس – إذ قدم الدليل الحقيقي الأول على أن النيوترينوات لها كتلة غير صفرية. وتجري التجربة CDMS في منجم السودان بمينيسوتا على عمق 750 م تحت سطح الأرض. كما أن منجم سدبوري في أونتاريو، كندا– منجم أُقيم للتنقيب عن المعادن المتركزة في تلك المنطقة والتي خلفها كويكب هائل ضرب المنطقة قبل بليوني سنة– هو مركز لعديد من تجارب المادة المعتمة أيضاً.

مع ذلك كل تلك الصخور فوق المناجم والأنفاق ليست كافية لتضمن خلو الكواشف من الإشعاع. لذا تعزز التجارب حماية الكواشف بطرق مختلفة. الدرع التي أجدها مبهجة على الخصوص هي رصاص قديم مأخوذ من سفينة فرنسية غارقة. الرصاص هو مادة كثيفة ماصة، ويكون الرصاص القديم قد تخلص من أي إشعاع تعرض له في السابق، لذلك فهو فعال في امتصاص الإشعاع من دون أن يكون مصدراً جديداً له.

تأتي دروع أخرى أكثر تقنية من البولي إيثيلين، على سبيل المثال، الذي يضيء إذا تفاعل معه شيء بقوة أكبر من أن يكون مادة معتمة. في كواشف السوائل النبيلة، مثل تلك التي تستخدم الإكزينون، يعمل الكاشف بحد ذاته كدرع واقية. تكون منطقة الامتصاص في كواشف الإكزينون هذه كبيرة جداً بحيث يلغي العلماء التجريبيون المنطقة الخارجية المُستخدمة فقط لحجب الخلفية الإشعاعية عندما تسجل حادثة إشارة محتملة تأتي فقط من المنطقة الداخلية.

التمييز مهم أيضاً. يستخدم علماء فيزياء الجسيمات مصطلحاً مختلفاً: "تحديد هوية الجسيمات" Particle identification (اختصاراً: Particle ID) لهذا الغرض. ربما ينبغي أن يكون مصطلح المختصر الدال على فيزياء الجسيمات بالإنجليزية Particle physics هو الاختصار PC، غيرَ أن متطلبات الهوية "ID" هو

مصطلح مشحون سياسياً هذه الأيام أيضاً. مهما كان الاسم، فإن التمييز- على عكس الوقاية- يتعلق بتمييز الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يتمكن من التقاطه من بين عدد من مُرشَّحي مادة معتمة محتملة. بقياس التأين Ionization والوميض الأولي Initial scintillation، يستطيع العلماء التجريبيون أن يميزوا بين الإشارة والإشعاع الخلفي.

تدل تقارير التجربة DAMA، تجربة وميض في مختبر غران ساسو الوطني في إيطاليا، على وجود إشارة منذ بعض من الوقت. ولكن لأن التجربة تفتقر إلى التمييز بين الإشارة وبين الخلفية- والاعتماد فقط على معلومات التوقيت- ولعدم توصُّل أي تجربة أخرى إلى نتائج مشابهة، لا يزال معظم علماء الفيزياء متشككين في مصداقية الإشارة.

كما سجلت تجارب أخرى أيضاً إشاراتٍ محتملة، ولكن بأحداث قليلة جداً- وطاقات منخفضة Low energies أيضاً. هناك سبب وجيه لنشكك في هذه النتائج أيضاً. ستتذكر أن الكواشف تقيس الطاقة المرتدة. عندما تكون هذه الطاقة صغيرة جداً، لا يمكن للكاشف أن يسجلها لأنها أقل من حساسية الجهاز. وأحداث الطاقة المنخفضة هي أقرب إلى حدود الطاقة المنخفضة التي يصعب تقييمها. لذلك فإن التشكيك في إشارة محتملة ذات طاقة منخفضة أمر مبرر، إلى أن تصلنا بياناتٌ أكثر، أو أن تؤكد تجارب أخرى الملاحظات المحتملة.

الكشف غير المباشر

قد تنجح تجارب الكشف المباشر التي تبحث عن المادة المعتمة العابرة للأرض في مهمتها، وتكتشف المادة المعتمة. ولكن هناك استراتيجية أخرى تضطلع على البحث عن إشارة قد تظهر إذا فنيت جسيمات المادة المعتمة مع جسيمات ضديد المادة المعتمة Anti-dark matter (أو نوع الجسيم نفسه إذا كان يُفني نفسه)، على أمل أن تحول طاقةُ جسيمات المادة المعتمة إلى أنواع أخرى من المادة. ربما لا يتواتر إفناء المادة المعتمة، لأن المادة المعتمة مُخفَّفة Dilute جداً. ولكن هذا لا يعني أنه لا يحدث على الإطلاق. بل يعتمد على ما يمكن أن تكونه طبيعة المادة المعتمة عندما تتبين لنا في يوم ما.

إذا- أو عندما- يحدث الإفناء، فإن التجارب على الأرض أو في الفضاء قد تعثر أخيراً على الجسيمات التي تولدت من الإفناء فيما يعرف بـ"الكشف غير المباشر" Indirect detection. تنظر هذه الأبحاث في الجسيمات المتولِّدة بعد اختفاء جسيمات المادة المعتمة الفانية. إذا حالفنا الحظ، فستحتوي هذه الجسيمات الناشئة على جسيمات وضديدات جسيمات Antimatter من النموذج المعياري (القياسي) Standard Model، مثل الإلكترونات وضديداتها – البوزيترونات Positrons – أو أزواج من الفوتون، ويمكن رصدُها جميعاً بالكواشف على الأرض وفي الفضاء. إشارات الفوتونات وضديدات الجسيمات هي أكثر الأهداف البحثية الواعدة المرتبطة بالكشف غير المباشر للمادة المعتمة بسبب ندرة ضديدات الجسيمات في الكوزموس. يمكن أن تكون الفوتونات مفيدة أيضاً، بما أن الفوتونات المتولدة من إفناء المادة المعتمة ستكون لها طاقة وتوزُّع مكاني مختلف عن الفوتونات المتولد عن الخلفيات الفيزيائية الفلكية.

لم تكن معظم الأجهزة التي تبحث عن نواتج النموذج المعياري من المادة المعتمة هذه لم تكن مصممةً في البداية ككواشف للمادة المعتمة. كان الهدف الرئيس لمعظم التلسكوبات والكواشف الموجودة في الفضاء، أو على الأرض هو رصدَ الضوء والجسيمات من مصادر فلكية في السماء. كان الهدف هو الوصولَ إلى فهم أفضل للنجوم والبُلسارات (النجوم النابضة) Pulsars والأجرام الأخرى التي تُعتبَر، بالنسبة إلى باحث تجريبي في المادة المعتمة، الخلفيةَ الفيزيائية الفلكية التي تحاكي إشارة المادة المعتمة.

وإذا نظرنا إلى ذلك من جانب آخر، فإن التشابه بين الجسيمات التي تُرسلها مصادر الخلفية الفيزيائية الفلكية وإفناءات المادة المعتمة المفترضة قد تشير إلى أن مشاهدات التلسكوبات الحالية يمكنها أن تخبرنا عن

المادة المعتمة أيضاً. إذا فهم علماء الفيزياء الفلكية المصادر التقليدية لمثل هذه الجسيمات، يمكنهم أن يميزوها بين الفائض والمادة المعتمة. على الرغم من احتمال الالتباس في التفسير، قد تنجح أبحاث المادة المعتمة غير المباشرة إذا فهمنا المصادر التقليدية فهماً جيداً لضمان أنها لن تكفي لتبرر ما قد يُكتشَف.

تُجرَى إحدى تجارب الكشف غير المباشر هذه على محطة الفضاء الدولية International Space Station. كان سام تينغ Sam Ting من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، الحائز جائزةَ نوبل، صاحبَ الفكرة الذكية بوضع كاشف جسيمات هناك للبحث عن البوزيترونات وضديدات الجسيمات. مطياف ألفا المغناطيسي Alpha Magnetic Spectrometer (اختصاراً: المطياف AMS) هو كاشف جسيمات في الفضاء. وهذا البحث هو توسيع لمدى البحث الذي قاده القمر الاصطناعي الفضائي الإيطالي PAMELA (الاسم الجميل هو اختصار أيضاً)، الذي نُشرت نتائجه أول مرة في العام 2013.

على الرغم من أن البيانات بدت مثيرة للاهتمام في البداية، أصبح تفسير المادة المعتمة غير مرغوب فيه لأنه، ومن بين عديد من الأمور، ستستلزم إشارات القمر الاصطناعي PAMELA والمطياف AMS إلى كثير من المادة المعتمة في الكون المبكر حتى يتمكن القمر الاصطناعي بلانك من رصد تأثيراتها المُشوِّهة على الخلفية الميكروية. النتائج التي كانت مفاجِئة في البداية تبدو لنا الآن مجردَ إشارة إلى أن علماء الفيزياء الفلكية في حاجة إلى تعلُّم كثير عن المصادر الفيزيائية الفلكية مثل البُلسارات. ما دام يمكن تفسير الإشارة بأنها نابعة من المصادر التقليدية، لا يمكن اقتراح أي حجة مقنعة لمصلحة المادة المعتمة.

من الممكن أن تتحلل المادة المعتمة إلى كوارك وضديد كوارك أو إلى غلوون Gluons– جسيمات تتفاعل بقوةٍ نووية قوية Strong nuclear force. في الواقع تتنبأ نماذج الجسيمات من النوع (WIMP (WIMP-type models WIMP-type models بأن هذا سيكون أكثر نتائج النموذج المعياري احتمالاً. فالخلفيات الفيزيائية الفلكية لمعظم أهداف الأبحاث البديهية– ضديدات البروتونات Antiprotons– واسعة جداً، ولكن في حالة ضديدات الديوتيرونات منخفضة الطاقة Low-energy antideuterons، التي هي حالة من حالات ضديدات البروتونات وضديدات النيوترونات ضعيفة الارتباط، فهي أقل بكثير. ربما تتاح فرصة للتجارب لاكتشاف المادة المعتمة من خلال فنائها إلى هذه الحالة المنخفضة الطاقة. ستبحث التجربة المستندة إلى البالون General AntiParticle Spectrometer (اختصاراً: التجربة، GAPS) التي أُطلقت في العام 2019 من آنتاركتيكا، عن هذه الإشارة.

كما قد تساعد الجسيمات غير المشحونة المسماة نيوترينوات، والتي تتفاعل بالقوة الضعيفة في اكتشاف المادة المعتمة بنحو غير مباشر. إذ من الممكن أن تنحبس المادة المعتمة في مركز الشمس أو الأرض، مما سيزيد من كثافة المادة المعتمة فوق قيمتها المعتادة، ويزيد احتمال الإفناء. الجسيم الوحيد القادر على الهروب، -ومن ثم يكون من المحتمل التقاطه هو النيوترينو Neutrino، لأنه– على عكس الجسيمات الأخرى– يتفاعل تفاعلا أضعف من أن يحول التفاعل دون هروبه.تبحث كواشف على الأرض مثل الكاشف AMANDA والكاشف IceCube والكاشف ANTARES عن هذه النيوتريونات عالية الطاقة.

كما تبحث كواشف على الأرض عن فوتونات وإلكترونات وبوزيترونات عالية الطاقة. وهناك النظام HESS، نظام مصفوفة تلسكوب التصوير الإشعاعي عالي الطاقة High Energy Stereoscopic System، في ناميبيا، ونظام تصوير تلسكوبي للإشعاع النشيط جداً Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System (اختصاراً: النظام VERITAS)، في آريزونا، وهما نظامان ضخمان من التلسكوبات الأرضية التي تبحث عن فوتونات من مركز المجرة، من المرجو أن يكون الجيل التالي من مراصد أشعة غاما عالية الطاقة جداً Very-high- energy gamma-ray observatory، مثل مصفوفة تلسكوب تشيرينكوف Cherenkov Telescope Array، أكثر حساسية.

ولكن لعل أهم أبحاث الكشف غير المباشر في السنوات القليلة الماضية هي التي أجراها مرصد فيرمي الفضائي لأشعة غاما Fermi gamma-ray space observatory – المعروف بنحو غير رسمي باسم فيرمي–

تيمناً باسم الفيزيائي الإيطالي الذي سُميت "فيرمينوس" أيضاً باسمه. يقبع مرصد فيرمي على قمر اصطناعي أُطلِق في بداية العام 2008، ويدور في السماء كل 95 دقيقة على ارتفاع 550 كم فوق الأرض. تتميز كواشف الفوتونات الأرضية بأنها أكبر بكثير من القمر الاصطناعي في السماء. ولكن الأجهزة على قمر فيرمي تتمتع بدقة تمييز Energy resolution ومعلومات اتجاهية Directional information أفضل، كما أنها حساسة جداً للفوتونات ذات الطاقات المنخفضة، ولديها مجال مشاهدة أوسع بكثير.

كان قمر فيرمي الاصطناعي مصدر كثير من التنبؤات المثيرة للاهتمام أخيراً حول المادة المعتمة. منذ أن بدأ فيرمي العمل، رصد عدة علامات على إشارات ليس فيها ما هو حاسم، ولكنها تقود إلى رؤى (تبصرات) مثيرة لما يمكن أن تكون عليه المادة المعتمة. أقوى إشارة في الوقت الحالي هي التي كان يدرسها الفيزيائي دان هوبر Dan Hooper من مختبر فيرمي (مختبر فيرمي الوطني للمُسرِّعات (المُعجِّلات) Fermi National Accelerator Laboratory، في باتفيا، إلينويز، قرب شيكاغو). لاحظ هو وزملاؤه أن الدراسة المعمقة في الانبعاث المنتشر للفوتون Diffuse photon emission بالقرب من مركز المجرة يظهر فائضاً عما هو متوقع من الخلفيات الفيزيائية الفلكية.

ومثل نتيجة البوزيترون السابقة والمفاجئة، تُظهر البيانات بنحو حاسم فائضاً يزيد على التوقعات. يبقى السؤال مجدداً عما إذا كان المكوِّن المفقود هو مصدراً فيزيائياً فلكياً مُغفَلاً، أو أنه شيء مثير فعلاً كالمادة المعتمة. لا يزال علماء الفلك منكبين على الدراسة في محاولة لتحديد الإجابة. حتى الآن، لا يبدو أن أيّاً من التفسيرات واضح أو مقنع تماماً.

كما ظهرت إشارة أخرى في الفوتونات من مصادر فيزيائية فلكية تقليدية، وليس لها تفسير معروف، وهي تأتي على شكل خط أشعة سينية X-ray line بطاقة من بضعة كيلو إلكترون فولت. أي نحو واحد على مئة من الطاقة التي يحملها الإلكترون. اللافت في هذه الملاحظة هو أنها خط Line. تذكَّرْ، الانتقال الذري والجزيئي بين مستويات طاقة مختلفة يعطي خطوطاً متماثلة، ولا تكون الإشارة قوية بشكل استثنائي، لذلك ليس من الواضح ما إذا كان هذا اكتشافاً حقيقياً. ولكن نقص وجود الدليل المقنع لم يمنع بعض الأبحاث من العمل على الإكزينون أو المادة المعتمة المتحللة Decaying كمصادر محتملة. لن نعرف الجواب إلى أن يبين مزيد من البيانات أو الأعمال النظرية ما إذا كان تذبذباً Fluctuation أو خلفية Background أو اكتشافاً حقيقياً لشيء جديد.

الإشارة الأخيرة المفترضة التي أود أن أذكرها، لأنها حفَّزت البحث الذي سأناقشه عما قريب، هو إشارة فوتون بطاقة 130 غيغا إلكترون فولت، والذي اقترحته بيانات قمر فيرمي الاصطناعي مبكراً. حتماً كانت الإشارة مثيرة للاهتمام، نظراً إلى التماثل بين الطاقة الملحوظة وكتلة بوزون هيغز Higgs boson، التي تقدر بنحو 125 غيغا إلكترون فولت. في ظل الافتقار إلى التفسير الفيزيائي الفلكي المناسب، يقترح بعض علماء الفلك أن الإشارة قد تكون ناتجة عن مادة معتمة مُفنية.

سأخبركم مقدماً أن الدليل لم يصمد أمام اختبار الزمن– أو أمام البيانات الإضافية– ونُفِي. ولكن في أثناء محاولة تفسير كيف يمكن للإشارة أن تنشأ، انتهى بنا الأمر أنا وزملائي– مات ريس Matt Reece وجيجي فان JiJi Fan وآندري كاتز Andrey Katz– باستكشاف فئة من النماذج التي ما كنا لنعثر عليها مصادفة لولا ذلك. كما هي الحال مع عديد من التطورات العلمية المثيرة، تبين أن النموذج مثير للاهتمام لأسباب تتعدى الدافع الأساسي، وأدى إلى نموذج القرص المعتم Dark disk model الذي سأشرحه قريباً.

المادة المعتمة في مُصادم الهدرونات الكبير

على الرغم من أنها تبدو أقل احتمالاً هذه الأيام، أيضاً قد تظهر الجسيمات WIMP في مصادم الهدرونات الكبير LHC، المُسرِّع (المُعجِّل) العملاق بالقرب من جنيف الذي يقع تحت الحدود الفرنسية السويسرية. تدور الفوتونات في اتجاهات متعاكسة في حلقة يبلغ محيطها 27 كم، لتصطدم بعضها ببعض بطاقات عالية. يمتد نطاق المصادم LHC عبر مدى من الطاقات، مما سمح بتوليد بوزون هيغز واكتشافه، وقد يسمح أيضاً بإنتاج جسيمات افتراضية أخرى مثل الجسيمات WIMP المستقرة ضعيفة التفاعل. إذا كان الأمر كذلك، فقد يسمح تفاعلها مع جسيمات النموذج المعياري باكتشافها في المصادم LHC.

حتى إن عثرنا على جسيمات جديدة في المُصادم LHC، فسيتطلب الأمر أدلة مساندة- مثل الكواشف المخصصة للبحث عن المادة المعتمة على الأرض أو في الفضاء- لإثبات وجود جسيم مكتشَف حديثاً يكوِّن المادة المعتمة. مع ذلك من المؤكد أن نتائج الجسيمات WIMP في المصادم LHC ستكون إنجازاً مهماً. لعلنا نتعرف على سمات أكثر تفصيلاً حول جسيمات المادة المعتمة ستصعب دراستها تحت أي من مناهج الاكتشاف الأخرى.

لكن، لن تتفاعل جسيمات المادة المعتمة كثيراً مع البروتونات التي تتصادم في المصادم LHC لأن المادة المعتمة لا تتفاعل مع المادة العادية إلا تفاعلات ضئيلة. وعلى الرغم من ذلك ربما تنتج جسيمات أخرى قد تتحلل إلى هذه الجسيمات. سيكون السؤال الذي يطرح نفسه هنا هو كيف نثبت حدوث هذا، بما أن المادة المعتمة لا تتفاعل مع الكاشف ومن ثم لا تترك بحد ذاتها أي دليل ملموس.

أحد الأماكن التي قد نبحث فيها هو تحلل الجسيمات المشحونة Charged particles. فالجسيمات المشحونة لن تتحلل فقط إلى جسيمات من المادة المعتمة المحايدة لأن هذه العملية لن تحافظ على الشحنة. وباكتشاف الجسيمات الإضافية المشحونة التي يجب أن تكون موجودة في الحالة النهائية، والتي لن تحمل طاقة وقوة حركة الجسيم المتحلل الأولي نفسها، لأن المادة المعتمة غير المرئية قد سحبت الطاقة والزخْم Momentum، عندها يمكن ظهور جسيم ضعيف التفاعل له مجموعة معينة من التفاعلات.

ستكون الإشارة التي تولّد المادة المعتمة هي تحديداً الطاقة التي فشلت التجربة في اكتشافها، إضافة إلى مدى توافق تنبؤات معدلات الأحداث والإشارات مع البيانات. فما لم تكن قوانين الفيزياء مختلفة جذرياً عما نعرفه، يمكن تفسير الافتقار الظاهر للحفاظ على الطاقة والعزم بأنه نتيجة جسيم غير مُكتشَف، يمكن ربطه عندها بالمادة المعتمة.

على الرغم من تفاعلها الضئيل مع المادة العادية، يمكن أيضاً أن تنتج الجسيمات WIMP في أزواج. قد يُنتج بروتونان متصادمان أحياناً اثنين من الجسيمات WIMP في عملية عكسية لفناء جسيمين WIMP التي ينتج عنها مادة عادية- الحسابات التي تؤدي إلى الغزارة المتبقية. يعتمد مدى تكرار ذلك على النموذج المعين- في المحصلة لا تفنى الجسيمات WIMP إلى بروتونات بالضرورة، لذلك فإن العملية العكسية غير مضمونة أيضاً. ولكن لعديد من النماذج ستكون هذه طريقة جيدة.

مجدداً يجب أن يواجه العلماء التجريبيون مشكلة أن المادة المعتمة بحد ذاتها لا يمكن التقاطها- فقط الجسيمات الأخرى التي تنتج معها. ولكن يستطيع التجريبيون رؤية الأحداث التي ينشأ فيها جسيم وحيد مثل فوتون أن غلوون (الجسيم الذي ينقل القوة النووية القوية بين الكواركات Quarks) مع المادة المعتمة. وقد بين العلماء النظريون أن هذه الأبحاث يمكنها من حيث المبدأ أن تعطي إشارة قوية بما يكفي.

حتى الآن، لم تجد دراسات المُصادم LHC أي شيء يدل على إنتاج المادة المعتمة. ولا يعرف العلماء ما إذا كان الأمر بسبب ضعف طاقة الجهاز أو بسبب خطأ في الدراسات النظرية التي تقترح العثور على جسيمات إضافية عند هذه الطاقات. مع ذلك لا تزال هناك فرصة معقولة للعثور على جسيمات إضافية في طاقة التصادمات التي ينتجها المصادم LHC. لعل أحدها سيكون المادة المعتمة.

البحث عن مادة معتمة أقل ضعفاً

على عكس الشخصية الخيالية في فيلم حرب النجوم أوبي وان كانوبي Obi-Wan Kenobi، ليست الجسيمات الضخمة ضعيفة التفاعل WIMP هي أملنا الوحيد، وإن كانت طرق الكشف هذه هي أفضل ما لدينا. ينجح الكشف المباشر فقط عندما يكون هناك تفاعل ما بين النموذج المعياري وبين جسيمات المادة المعتمة، ويضمن نموذج الجسيمات WIMP ذلك الاحتمال. إضافة إلى ذلك، يضمن الإنتاج الحراري كميات متساوية من المادة المعتمة وضديد المادة المعتمة (أو أن المادة المعتمة هي جسيم ضديد لنفسها) لذا فإن الإفناء ليس مستبعداً أيضاً. ولكن ماذا عن الاقتراحات الأخرى لماهية المادة المعتمة؟ كيف نبحث عنها؟

للأسف، أي مرشح للمادة المعتمة لم يستبعد بعد سيكون من الأصعب العثور عليه. يجب أن تكون استراتيجية البحث ملتزِمة بدقة بالنموذج المعين. القدرة على الوصول بالتقنيات الحالية ليست مضمونة بالضرورة. ربما يحالفنا الحظ وتكون المادة المعتمة شفافة– ستكون رقيقة، بالكاد يمكن رؤيتها باستخدام هذه الطرق التي تفترض بعض التفاعل مع النموذج المعياري. ولكن نظراً إلى الشكوك، أنا أرى أن نركز أكثر على الكشف من خلال القوة التي نعرف أنها موجودة في المادة المعتمة: الجاذبية. قد لا يتمظهر تفاعل المادة المعتمة مع نفسها أو مع مادة أخرى بوضوح وبنحو مباشر، ولكننا سنرى الآن أن تفاعلاتها قد تكشف عن نفسها من خلال التوزُّع الدقيق للكتلة في الكون.

المادة المعتمة المترابطة اجتماعياً

التمدُّن دافع حيوي لعديد من التطورات في الحياة المعاصرة. اجمعْ ما يكفي من الأشخاص وستزدهر الأفكار، ويزدهر الاقتصاد، وتثمر الفوائد الوفيرة. تتطور المدن مع توسعها- وتصبح أكثر جاذبية مع انتقال الناس إليها، ومع خلق فرص العمل، وتهيئة ظروف عمل ومعيشة أفضل. ولكن لا تكاد مدينة ما تصبح مكتظة جداً، حتى تدفع الجريمةُ وارتفاع تكاليف السكن والمشكلات المدنية الأخرى الناسَ إلى الانتقال منها إلى أحياء أقل كثافة، أو حتى أبعد مسافةً- خارج المدينة بكاملها. قد تنمو بقية المدينة كما هو مخطط لها، ولكن سوف تحبط طموحات مطوري العقارات المبالغين في تفاؤلهم لعدم توافق عدد السكان المتناقص مع المباني الشاهقة في المناطق الداخلية من المدينة، فلا يتحقق النمو السريع المتنبَّأ به في البداية. ومن دون مراكز مدنية مستقرة، لن تزدهر الضواحي أيضاً، ومن ثم سيحبَط مزيد من مطوري العقارات أيضاً.

يتبين أن النمط العام نفسه ينطبق على نمو بنية الكون. سبق أن شرحت فهمنا الحالي للمادة المعتمة والمشاهدات العديدة والتوقعات التي تُقنعنا بأن المادة العادية والمادة المعتمة تتفاعلان كلتاهما مع الأخرى تفاعلاً ضعيفاً جداً. تتوقع المحاكاة الرقمية المستندة إلى المادة المعتمة التي تتفاعل فقط بالجاذبية بحجم وكثافة وتركيز وأشكال المجرات والعناقيد المجرية. ومثل التنبؤ بالنمو الحضري واسع النطاق، تتوافق التوقعات عن بنية واسعة النطاق مع المشاهدات الرصدية توافقاً جيداً جداً.

ولكن المحاكاة العددية Numerical simulations الدقيقة التي تفترض أن الخواص العادية للمادة المعتمة لا تتوافق دائماً مع الصفات الأساسية المرصودة للكثافة ضمن نطاقات أصغر. إذ لا تتوافق المناطق المركزية في المجرات والعناقيد المجرية وعدد المجرات القزمة الأصغر بالقرب من درب التبانة مع التوقعات النظرية. وكما هي بالنسبة إلى المناطق الداخلية في المدن المأهولة بكثافة أقل والضواحي قيد الإنشاء، فإن كثافات مراكز المجرات والأرقام المتنبَّأ بها للمجرات التابعة هي توقعات مرتفعة. كذلك لا تتوافق التنبؤات مع "التوزع المكاني" patial distribution للمجرات القزمة في مجرة المرأة المسلسَلة Andromeda والمجرات الأخرى.

قد يتبين أن المحاكاة غير دقيقة أو المشاهدات الرصدية لا تزال ناقصة. ولكن قد يقترح الاختلاف بين التنبؤات والمشاهدات الرصدية للبنية في نطاقات صغيرة قد تقترح أن المادة المعتمة مختلفة عما هو مفترض حالياً. لعل المادة المعتمة ليست ضعيفة في النهاية.

على الرغم من أنه من المعروف أن التفاعل بين المادة المعتمة والمادة العادية ضئيل جداً، يمكن أن يكون التفاعل بين جسيم مادة معتمة وجسيم آخر للمادة المعتمة كبيراً نوعاً ما. ويصبح هذا التفاعل الذاتي أقل تقييداً بغياب استشعار المادة المعتمة، الذي يختبر فقط التفاعلات بين المادة المعتمة والمادة العادية. قد تكون كبيرة بما يكفي لتستحق بعض الاهتمام.

وعلى الرغم من أننا نستطيع الآن أن نؤكد الأفكار الرئيسة لكيفية نمو بنية الكون، تدل الاختلافات المحتملة على أن العلم لم يتقدم بما يكفي ليعتبر الموضوع منتهياً. وبالنسبة إلى الباحثين هذا هو الوضع المثالي.

فبالتأكيد سنتعلم كثيراً – مهما كان الجواب النهائي. يشرح هذا الفصل موضوع بنية الكون في النطاقات الصغيرة، ولمَ يمكن للمادة المعتمة المتفاعلة ذاتياً أن تجيب الأسئلة المطروحة حول هذه النطاقات.

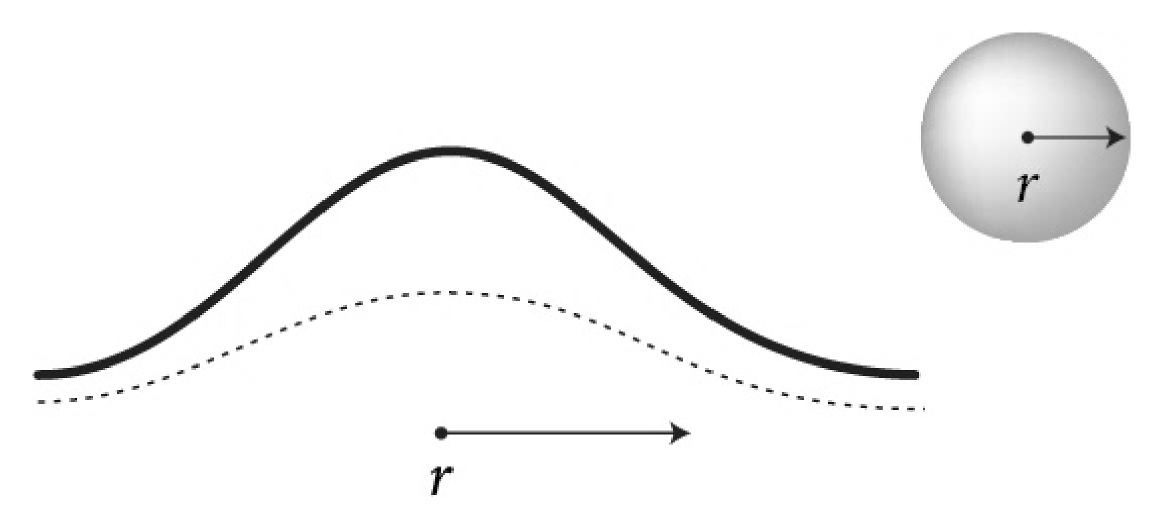
قضايا النطاقات الصغيرة

شرح الفصل الخامس كيف تحدد الجاذبية الملقاة على المادة المعتمة مخططاً أولياً حدد بنية الكون. دفعت المادة المعتمة في الكون الأولي إلى نشوء تباينات كبيرة في الكثافة، ونمت المجرات في المناطق الأكثر كثافةً التي ألقت قدراً أكبر من الجاذبية. بمجرد أن تشكلت، اندمجت المجرات في عناقيد مجرية اصطفت في صفائح وخيوط مُشكِّلة الدعامات التي بنيت عليها بنى أخرى. على الرغم من أن تفاصيل كل مجرة أو عنقود مجري منفرد يعتمد على الحالة الأولية غير المعروفة، فإن علماء الفلك قادرون على توقع الخصائص الإحصائية الإجمالية لتوزُّع المجرات والعناقيد المجرية، ومعظم هذه التوقعات تتوافق مع المشاهدات الرصدية توافقاً جيداً.

لكن توقعات البنى على نطاق صغير – مثل بنية المجرات القزمة– هي توقعات غير راسخة تماماً. فحسابات كثافة الأجزاء المركزية من المجرة مرتفعة جداً وتوقعات عدد المجرات القزمة الصغيرة التي تدور في درب التبانة عالية جداً. إذ لا يرصد الراصدون مثل هذا العدد الكبير من البنى الصغيرة داخل الهالات الأكبر أو في الهالات المنعزلة الأصغر والتي يجب – في مثل هذه الصورة الهرمية – أن تبقى موجودة حتى يومنا هذا.

لعل أكثر التناقضات شهرة هو ما يُعرف بمعضلة الحدبة-النواة Core-cusp problem. إذ لا يتنبأ علماء الفلك وعلماء الكوزمولوجيا فقط بنوع الأجرام التي يجب أن توجد في الكون Universe، بل وكيف يجب أن تتوزع المادة ضمنها. تكون توقعات منحنيات الكثافة Density profiles هذه - كما هو معروف عن توزُّع الكتلة مع البعد عن مراكز الأجرام- أنها محدّبة الشكل. وهذا يعني أنه من المتوقع أن تتزايد كثافة المادة المعتمة كلما اتجهنا نحو المراكز، مما يؤدي إلى مناطق مركزية كثيفة جداً في عمق المجرات والعناقيد المجرِّية.

ولكن الراصدين يقيسون توزُّع الكثافة (إلى حد ما) بالفعل، وقد فشلوا حتى الآن في تأكيد هذا التنبُّؤ. في الواقع، وفقاً لما قاسوه حتى الآن، فإن معظم المجرات ليست محدَّبة، بل تظهر ما هو معروف بمنحنيات النواة Cored profiles. (انظر: الشكل 37). هذا المصطلح مربك، ليس فقط لأن سامسونغ غالاكسي كور هو اسم هاتف ذكي. لعل معظم الناس يفكرون في المركز على أنه كثيف، وهو أمر ينطبق على مركز الأرض المنصهر، على سبيل المثال. غير أن مصطلح كثافة النواة يشير إلى عكس المتوقع- أي أن المركز مفرَّغ من المادة، كأنك فرَّغتَ النواة من التفاحة. بالطبع لا أحد يفرِّغ مركز مجرة بكاملها. ولكن المشاهدات الرصدية تشير إلى أن كثافات المادة ليست شديدة التحدُّب في مراكز المجرات، كما هو متوقع. لكن تكون منحنيات كثافة المنطقة المركزية مسطحة نسبياً في هذه المناطق المُفرَّغة. كما قد ينطبق الأمر نفسه على العناقيد المجرية.



[الشكل 37] تشير المحاكاة إلى أنه في المجرة، يجب أن تكون كثافة المادة المعتمة عالية جدا في المركز. ولكن المشاهدات الرصدية تشير إلى منحنى "مُفرَّغ"- أي انخفاض كثافة المادة المعتمة في المناطق المركزية. في كلتا الحالتين يزداد ارتفاع منحنى الكثافة في المركز كما هو في الشكل، ولكن منحنى التوزع المُحدَّب يكون أعلى.

إن تفسير لِمَ تبدو الكثافة مسطحة أو مفرغة وليست محدَّبة- وفقاً لتنبؤات المادة المعتمة- يُمثِّل تحدياً مهماً لأبسط نماذج المادة المعتمة. هذا إضافة إلى مشكلة التابع المفقود Missing satellite problem (عدد المجرات القزمة التي تدور حول مراكز المجرات الأكبر هو أقل مما هو متوقع) ومشكلة "أكبر من أن يفشل" Too big to fail problem (وهو موضوع ذو صلة لا تتوافق فيه تنبؤات المجرات الأضخم والأكثر كثافة مع المشاهدات الرصدية)، قد تشير مجتمعة إلى عدم ملاءمة النموذج المعياري للمادة المعتمة الباردة.

كما أن هناك مشكلة أخرى لاحظناها أخيراً فيما يخص تنبؤات المادة المعتمة – والتي قد يعالجها نموذج قرص المادة المعتمة الذي سأشرحه قريباً – وهي أن المجرات القزمة التابعة التي تدور حول المجرات الأكبر لا يبدو أن لها التوزيع المكاني الذي توقَّعه علماء الفلك. ففي حين كان التوقع هو أن المجرات القزمة التابعة ستتوزع بشكل شبه كروي في كل الاتجاهات، وجدت نحو ثلاثين مجرة قزمة تدور حول المرأة المسلسلة يتوزع نصفها تقريباً على مستوى Plane واحد تقريباً – ولمعظمها اتجاه مداري مشترك. كما عثرنا على توزُّع شاذ مشابه لبعض المجرات القزمة التي تدور في درب التبانة.

قد يدل التوزُّع الشديد التوازي Close alignment والاتجاه الدوراني Rotational direction المشترك للمجرات القزمة على أنها نشأت من أقراص مجرات مندمجة. ولكن حتى إن فسر الاندماج التوزُّع المكاني، تبدو المجرات القزمة التابعة كأنها تحتوي- بنحو إشكالي- على كثير من المادة المعتمة إلى درجة يصعب معها أن يكون أبسط تفسير صحيحاً. قد يتطلب الأمر نموذج مادة معتمة غير معياري لتفسير المجرات القزمة الغنية بالمادة المعتمة والتي تتوزع على شكل مستوى.

بسبب كل هذه الاختلافات، فإن النتائج العددية والمشاهدات الرصدية لا تزال مجرد أرقام أولية. على الأقل قد تختفي بعض هذه المشكلات إذا تبين أن افتراضاتنا، ومشاهداتنا، ومناهج محاكاتنا غير موثوقة. قد تُبين محاكاة أكثر دقة خطأً في النتيجة الأولية، أو فهماً غير سليم لنتائج المادة العادية – مثل تغذية راجعة Feedback من السوبرنوفا تؤثر في تشكل البنية – وفي هذه الحالة ستكون نماذج المادة المعتمة التقليدية كافية لتفسير بنية الكون حتى من دون تعديل على خواص المادة المعتمة. ولكن إن استمرت المشكلة، قد يتحول عدم التوافق المتبقي إلى عبء على أبسط نماذج المادة المعتمة ويبين الحاجة إلى خواص مادة معتمة أكثر تعقيداً.

عند تأمل هذه النتائج، ربما يكون من المُشجِّع أن نُذكِّر أنفسنا بأنه حتى في تسعينات القرن العشرين قدَّمت أساليب المحاكاة المبكرة – التي أهملت الطاقة المعتمة – تنبؤات لم تتوافق مع البيانات. واعتقد علماء

كُثُرُ أن مناهج المحاكاة والمشاهدات الأولية كانت مضللة، وأن التحسينات الإضافية على البيانات والتنبؤات من شأنها أن توفق بين النتائج. وبناء على هذه الحسابات الأولية وعلى الإشارات إلى أن التنبؤات الدقيقة قد تُبشر برؤى جديدة تعالج التناقضات بمجرد أن تأخذ تأثير بنية المادة المعتمة – اكتشاف جديد بالكامل – بعين الاعتبار. لعل هذه المشكلات الحالية حول البنية على النطاق الصغير ستجد طريقها إلى الحل فقط باكتشافات جديدة توضِّح الخواص الفيزيائية الكامنة للمادة والطاقة في الكون. ستحدد التطورات الرصدية الحوسبية في العَقد المقبل ما إذا كان الأمر كذلك بالفعل.

تأثيرات ممكنة

على الرغم من عدم وجود تأكيد حاسم، بدأ عدد من علماء الفيزياء الفلكية وعلماء الكوزمولوجيا يأخذون هذه التناقضات على محمل الجد، وبدأوا يدرسون إمكانية أن تكون للمادة المعتمة تفاعلات أخرى غير التفاعل بالجاذبية. حتى وصل البعض إلى القول إن معادلات آينشتاين عن الجاذبية ليست صحيحة تماماً. على الرغم من الاهتمام الذي يوليه بعض علماء الفيزياء لتعديلات الجاذبية، أجد هذا الخيار المبالغ فيه غير مرجح أبداً. فالدليل عن الجاذبية العادية الملقاة على المادة المعتمة الذي تناولتُه سابقاً مقنع جداً.

الأصعب هو تفسير مشاهدات مثل عنقود الطلقة المجرِّي. سيكون من الصعب تفسير هذا وأجرام شبيهة أخرى – تتألف من عناقيد مجرية اندمجت لتترك غازاً متفاعلاً في الوسط ومادة معتمة في الأطراف الخارجية – بأي تفسير سوى أن المادة المعتمة ضعيفة التفاعل تتصرف وفقاً لمعادلات الجاذبية العادية. بأي حال من الأحوال، قبل التفكير في بديل جذري من دون أساس نظري متماسك، علينا أولاً أن نفكر في أسباب أخرى "مملة" للطرق التي تؤدي بها التوقعات إلى نتائج مضللة – كأن تؤدي المادة العادية دوراً أكبر مما تفترضه المحاكاة أو أن تكون المادة المعتمة مختلفة عن تعريفات التوقعات التقليدية.

حضرت أخيراً مؤتمرَين نوقشت فيهما مواضيع بنية النطاق الصغير وحلولها المحتملة. كان الأول ورشة عمل نظمها زملائي في فيزياء الجسيمات في قسم الفيزياء في هارفارد حول موضوع المادة المعتمة ذاتية التفاعل. بينما نظم علماء الفيزياء الفلكية من مركز هارفارد لعلوم الفيزياء الفلكية Harvard Center for Astrophysics المؤتمر الثاني، بعنوان "مناقشة المادة المعتمة"، الذي انعقد الربيعَ التالي في العام 2014. من حسن الحظ أن المناقشات كانت عن الجوهر وليس الآراء – التي يمكنها أن تخرج النقاشات العلمية عن مسارها إذا ما أُعطيَت أهمية مبالغاً فيها.

أحد الأسباب التي تجعلني أجد هذه المؤتمرات مهمة هو الفرصة الكبيرة التي توفرها للحوار بين علماء الفيزياء والفيزياء الفلكية في هارفارد. أُقيم مركز الفيزياء الفلكية، حيث يعمل علماء الفلك، في العام 1847 في أعلى نقطة في كيمبريدج لوضع أكبر تلسكوب في العالم في ذلك الزمن – بقطر 15 بوصة. هذا المكان – الذي لا يزال باقياً على العكس من المنزلة العلمية للتلسكوب – يفصل بين علماء الفلك وعلماء الفيزياء بمسافة ميل، لذلك لا نجتمع مصادفة عند آلة صنع القهوة أو براد الماء. ولكن المؤتمرات جمعتنا- – مع عديد من علماء الفلك والفيزياء الزوار – في مكان واحد.

ولكن الميزة الأساسية لهذه المؤتمرات هي أن النتائج المعروضة كانت جديدة ومبتكرة. اشتملت المواضيع على الأدلة الموجودة بالفعل للإجابة عن مشكلات بنية النطاق الصغير وعلى الحلول الممكنة، التي جادل المشاركون في المؤتمر بأنها قد تكون إما ناشئة بسبب تقدير غير كاف لدور المادة المعتمة، وإما أنها أمر جديد تماماً مثل التفاعلات الذاتية للمادة المعتمة.

وجادل المتحدثون الذين ناقشوا لمَ قد تؤثر المادة العادية في تشكُّل البنية على النطاقات الصغيرة بأن إدخال المادة المعتمة في أساليب محاكاة عددية قد يقطع شوطاً بعيداً نحو حل التناقضات بين التنبؤات

والمشاهدات الرصدية. افترضت أساليب المحاكاة الأولية أن المادة المعتمة تهيمن على ديناميكيات ونمو البنية، في حين تسقط المادة العادية ببساطة في آبار الجاذبية المُحتَملة التي تصنعها المادة المعتمة. على الرغم من أنها قد تضيء المناطق الأكثر كثافة والأكبر حجماً بعد تشكُّل النجوم، إلا أن أثر المادة العادية أُهمِل فيما عدا دورها كمسلط للضوء على أماكن المادة المعتمة الكثيفة.

ظن الفيزيائيون بداية أن المادة العادية لن تؤثر تأثيراً مهماً في نمو البنية، إضافةً إلى أنها كانت ذات تأثير حوسبي كبير جداً يحول دون إدخالها بموثوقية. فحتى حالياً يبقى هناك قدر كبير من عدم اليقين عندما يحاول علماء الفيزياء إدخال تأثير المادة العادية، فضلاً عن المادة المعتمة. وإذا أخذنا بعين الاعتبار حجم الذاكرة والطاقة الحوسبية المتاحة حاليا، فلا أحد يستطيع أن يحاكي كل شيء بتفاصيله، لذلك يضطر علماء الفلك إلى استخدام تقديرات وافتراضات في عمليات المحاكاة. ومع ذلك تبدو المحاكاة العددية المحدودة الجارية حالياً والتي تأخذ المادة العادية بعين الاعتبار أنها قادرة على التخفيف من التناقضات.

تعلل بعض التأثيرات التوافق المُحسَّن بين المحاكاة والملاحظات. تتفاعل المادة النموذجية من خلال القوى إضافةً إلى الجاذبية، حتى إن كان أثرها التجاذُبي الأولي ضئيلاً، قد لا يكون تأثيرها في البنية – وخاصة في النطاقات الصغيرة – كذلك. على سبيل المثال أحد التفسيرات المحتملة لقلة المجرات التابعة المرصودة هي أنها خافتة جداً. فقد يسخن الغاز بين المجرِّي عندما ترسل النجوم أشعة فوق بنفسجية – أشياء ذات صلة بالمادة العادية. ولكن إذا كانت الهالات لا تحتوي على غاز كاف، فلن تتشكل النجوم، مما سيجعلها خافتة ويصعب رصدها بالتلسكوبات الحالية.

هناك تفسير محتمل آخر لقلة رصدنا للمجرات التابعة ومراكز المجرات الأخف كثافة مما هو متوقع، وهو أن انفجارات السوبرنوفا تطرد المادة إلى خارج المنطقة الداخلية للمجرات المستضيفة، مخلفةً وراءها منطقة داخلية أقل كثافة. يمكن مقارنة توزُّع المادة المعتمة الناتجة بكثافة السكان في المدن في أكثر المناطق الداخلية للمدينة كثافة. ففي أعقاب الاضطرابات يزيد تفجُّر العنف الحاجةَ إلى مغادرة المركز المستنزَف. تماماً مثل المنطقة الداخلية المأهولة في المدينة، لا تتزايد كثافة المنطقة الداخلية التي شهدت كثيراً من التدفق بفعل انفجارات السوبرنوفا باتجاه المركز.

إضافةً إلى ذلك، يمكن أن تؤيِّن الطاقة التي يطلقها انفجار السوبرنوفا الغازَ في الأطراف الخارجية من المجرة وأن تسخنه. مما قد يفجر كثيراً من المادة العادية التي ربما تكون قد تكثفت إلى مجرات قزمة تابعة تدور حول المجرات الأكبر، أو تنتظر لتنهار إلى مناطق أكثر كثافة والمطلوبة لتشكُّل النجوم. سيكون لهذه المجرات القزمة الخارجية كمية أقل من المادة المعتمة، وستكون أكثر خفوتاً، مما يجعل العثور عليها أكثر صعوبة.

يتطور الدليل باستمرار مع وضد الدور الكبير للمادة العادية في نطاق البنية الصغير مع تطور المناهج والقوة الحوسبية. اندلعت عدة نقاشات حيوية في المؤتمرات – كما أشار أحد الزملاء من علماء الفيزياء، كانت نبرة علماء الفلك توافقية إلى درجة تبعث على السرور، والجميع يحاولون العثور على الإجابات الصحيحة وليس فقط إثبات رأي. حتى أولئك الذين أكدوا أهمية المادة العادية أقروا بأنها لن تكفي لدحض جميع التناقضات إذا استمر رصد مشكلات النطاق الصغير في المجرات القزمة المنعزلة، حيث يتوقع أن تكون التغذية الراجعة للسوبرنوفا هناك ضعيفة. إذا كان الأمر كذلك، كما تقترح المشاهدات الرصدية الحالية، فإن ذلك سيستوجب وجودَ شيء آخر غير المادة العادية. على الرغم من أن الجميع في المؤتمرات اتفقوا على أن المادة العادية يمكنها أن تساعد على حل التناقضات بين المحاكاة وبين البيانات، أدرك معظم علماء الفيزياء والفلك الحاضرين أن التنبؤات الخاطئة عن المجرات التابعة قد تقترح تعديلاً جذرياً للنموذج المعياري للمادة غير المتفاعلة.

المادة المعتمة ذاتية التفاعل

نظراً إلى المواضيع المثيرة للاهتمام التي ظهرت عندما تعارضت أساليب المحاكاة مع البيانات، من المهم التفكير في نماذج مادة معتمة بديلة يمكنها أن تعالج هذه المواضيع. أكثر الاحتمالات إثارة للاهتمام هو أن افتراض أن المادة المعتمة بسيطة وغير متفاعلة هو احتمال مضلل، وأن تفاعلات المادة المعتمة، عدا تأثير الجاذبية، تؤثر في البنية. هذا الاحتمال يساعد علماء الفيزياء على معرفة مزيد عن تفاعلات جسيمات المادة المعتمة بين بعضها وبعض، وما القوى الجديدة التي يمكن أن تلقيها عليها. ستخبُرنا القياسات الجارية وأساليب المحاكاة المتطورة بمزيد عن طبيعة المادة المعتمة – مهما ستكون النتائج. حتى إن لم تبق التناقضات، فسنفهم طبيعة المادة المعتمة وكيف تساهم المادة المعتمة والمادة العادية في البنية الكونية. ولكن إن بقيت التناقضات على حالها، فعندها ستكون دليلاً على التفاعل الذاتي.

المادة المعتمة ذاتية التفاعل اقتراح جديد واعد، إلى حد ما، لأننا نعرف القليل عن خواص المادة المعتمة. فقط لأن المادة العادية قد تتأثر بقوى غير قوى الجاذبية مثل القوة الكهرومغناطيسية، فربما تتأثر المادة المعتمة بها كذلك أيضاً. على الرغم من أن الافتراض المعتاد هو أن المادة المعتمة تتأثر بتفاعلات جاذبية وربما تفاعلات ضعيفة مع المادة العادية، فإن عدم رصدنا للمادة المعتمة في التجارب لا يقدِّم لنا معلومات عن تفاعلات المادة المعتمة مع نفسها. ستجذب Attract جسيمات المادة المعتمة ذاتية التفاعل جسيمات مادة معتمة أخرى أو تُنفِّر Repel، ولكن ليس جسيمات المادة التي نعرفها. ربما تتأثر المادة المعتمة بقوى معتمة لم نكتشفها بعد، وقد تؤثر في جسيمات المادة المعتمة ولكن ليس على جسيمات المادة العادية. لأن القوى المعيارية مثل القوة الكهرومغناطيسية تؤثر فقط في المادة العادية، والقوى المعتمة تؤثر فقط في المادة المعتمة، فستبقى جسيمات المادة المعتمة وجسيمات المادة العادية بشكل أساسي غافلة بعضها عن بعض.

ستكون المادة المعتمة ذاتية التفاعل اجتماعية مثل المادة العادية. ولكنها ستكون منغلقة أيضاً – تتفاعل فقط مع مثيلاتها. قد تُبعثر Scatter المادة المعتمة جسيمات مادة معتمة أخرى، ولكن لن تكون المادة العادية مرئية بالنسبة إليها مثلما أنها لن تكون مرئية بالنسبة إلى المادة العادية. بما أن تجارب الكشف المباشرة تبحث فقط عن التفاعلات بين المادة المعتمة والمادة العادية، لا يمكن استبعاد هذا الاحتمال، وربما يكون الاحتمال المفضل عند دراسة البنية.

نحن لا نعلم ما الشكل الذي ستتخذه القوى الجديدة إذا كانت المادة المعتمة تتفاعل مع نفسها. مع ذلك فإن القوى بين جسيمات المادة المعتمة مقيدة، ولا يمكن أن تكون تفاعلات المادة المعتمة الذاتية تفاعلات قوية جداً. تَذكَّرْ أن الدليل القاطع على وجود المادة المعتمة هو عنقود الطلقة الذي تشكل من عناقيد مندمجة، إضافةً إلى عناقيد مجرِّية أخرى تأخذ الشكل نفسه. تخبرنا مشاهدات تأثير عدسة الجاذبية أن المادة المعتمة من عنقود مجري مرت خلال المادة المعتمة من عنقود مجري آخر من دون عرقلة – فأدت إلى شكلين منتفخين في الأطراف الخارجية، وبقي الغاز محبوساً في المنطقة المركزية بينهما.

إذا تفاعلت المادة المعتمة مع نفسها بقوة – كما تفعل المادة العادية – فستعمل كالغاز وتبقى في الوسط. ولكن الأطراف الخارجية المنتفخة تشير إلى أن المادة المعتمة لم تفعل ذلك ومرت بسهولة. هذا لا يخبرنا بأن المادة المعتمة لا تتفاعل على الإطلاق. ولكنه يقيد القوة ومقياس المسافة التي يمكن أن تؤثر فيها القوة. تتقيد قوة تفاعلات المادة المعتمة أيضاً بأشكال هالات المجرات، الحساسة لتفاعلات المادة المعتمة.

ولكن هذه القيود لا تستبعد احتمال التفاعلات الذاتية. بل تضع حدوداً على القوة والشكل المسموح به. حتى مع مراعاة هذه القيود، يمكن أن تكون التفاعلات الذاتية من حيث المبدأ قوية بما يكفي لتعالج المشكلات في تنبؤات بنية النطاق الصغير.وقد بيَّن المتحدثون في المؤتمرات لِمَ يمكن أن تساعد التفاعلات الذاتية للمادة المعتمة في تفسير بعض جوانب البنية المحتملة، إضافةً إلى تخفيض الكثافات المركزية لأكبر المجرات التابعة، مما ينتج توافقاً أفضل بين التنبؤات والمشاهدات الرصدية.

على سبيل المثال، يمكن أن يعالج التفاعل الذاتي مشكلة الكثافة الكثيرة المتوقعة في مراكز المجرات. في غياب التفاعلات غير الجذبية، ستستمر المادة المعتمة في التدفق نحو المركز؛ لأن المادة المعتمة تتحرك ببطء

يجعلها تخضع لقوة الجاذبية في البنى الموجودة، مما يؤدي إلى تزايد الكثافة تزايداً كبيراً. ولكن التفاعل المُنفِّر بين جسيمات المادة المعتمة سيُبقي الجسيمات متباعدة بعضها عن بعض – مما يمنعها من التراكم بالقرب بعضها من بعض. الأمر يشبه لو أن يكون الجميع في محطة قطار مكتظة، يحيطون أنفسهم بأمتعتهم، تاركين أي شخص آخر على بعد ذراع منهم. سيقدم التفاعل المنفر بين جسيمات المادة المعتمة حاجزاً واقياً – يمنع المادة المعتمة من أن تصبح شديدة الكثافة.

تؤكد محاكاة المادة المعتمة ذاتية التفاعل هذا الحدْس، وفعلاً تؤدي إلى أشكال مفرغة مركزياً – بمناطق مركزية داخلية ذات نسبة كثافة ثابتة نسبياً – وليس إلى أشكال محدَّبة. يمكن أن تزيد كثافة المادة نحو مركز المجرة أو العنقود المجرِّي فقط قبل أن تصل إلى حد التشبُّع Saturates ولا تزيد كثافتها أكثر. من المحتمل حل أي مشكلة قائمة في بنية النطاق الصغير إذا تفاعلت المادة المعتمة بهذه الطريقة.

تنبؤات المادة المعتمة ذاتية التفاعل في المجرات وعناقيد المجرات تضمن أن المشاهدات وأساليب المحاكاة المستقبلية ستخبرنا كثيراً عن خواص المادة المعتمة. ولمَّا كانت النماذج المختلفة للتفاعلات تقدم تنبؤات مختلفة، فإن مقارنة المحاكاة بالنماذج ستساعد في التمييز بين أنواع التفاعلات المختلفة.

فقط بطرح البدائل يمكننا أن نستغل البيانات الوفيرة حول شكل البنى في الكون لكي نفهم نتائجها فهماً كاملاً. ربما للمادة المعتمة تفاعلات تؤثر في البنية بحيث تتوافق المحاكاة مع البيانات بنحو أفضل. أو ربما تؤدي المادة المعتمة العادية إلى تنبؤات أفضل حول البنية من المادة المعتمة ذاتية التفاعل، ما يتيح لنا أن نستبعد بنحو قاطع مزيداً من النماذج التفصيلية بمجرد أن تكون لدينا محاكاة وقياسات موثوق بها تماماً. مهما كانت النتيجة فسنتعلم أكثر بكثير مما وصفته تجارب الجسيمات WIPM التقليدية التي تطرقنا إليها في الفصل السابق.

ولكن تفاعل المادة المعتمة مع نفسها – على قدر ما هو مثير – ليس هو تحديداً موضوعَ بحثي الأخير، الذي سأقدمه في الفصل التالي. في المحصلة ليست المادة المعتمة المتفاعلة وغير المتفاعلة هما الاحتمالين الوحيدين. بالتركيز على الأسود والأبيض فإننا نهمل تدرجات الرمادي – فضلاً عن المرقط والمخطط – بافتراض أن المادة المعتمة تتفاعل بجميع التفاعلات أو بلا شيء منها على الإطلاق يقودنا إلى إغفال غِنى العالم بالاحتمالات. سيتحدث الفصل التالي عن الفكرة المثيرة التي تقول إن المادة المعتمة – كالمادة العادية – هي أكثر تعقيداً بالفعل. ربما للمادة المعتمة مكوِّن غير متفاعل، ومكوِّن ذاتي التفاعل أيضاً، وكلاهما يساهم في بنية الكون وسلوكه.

يستخدم العلماء والراصدون الهواة أحياناً مبدأ نصْل أوكام Occam's Razor لإرشادهم عند تقييم اقتراح علمي ما. يذهب هذا المبدأ المنتشر إلى أن أبسط نظرية تفسر الظاهرة هي الأفضل في الغالب. والمنطق العقلاني لهذا المبدأ يفترض أنه من المحتمل أن فكرة بناء بنية معقدة، في حين ستفي بالغرض بنية أبسط، هي ليست بالفكرة الحسنة.

مع ذلك هناك عاملان يُضعفان سلطة مبدأ نصل أوكام، أو على الأقل يتطلبان الحذر عند استخدامه كعكاز. لقد تعلمتُ درساً قاسياً يجعلني أحترس من العكاكيز – الفكرية والمادية. فذات مرة عندما استخدمتُ عكازاً في أثناء علاج كاحلي المكسور، اتكأتُ بنحو خاطئ فسبَّب أذى في أعصاب الذراع. والنظريات التي تتمسك بإملاءات نصل أوكام تعالج أحياناً مشكلة عويصة في حين تولد مشكلات تؤثر في جوانب أخرى – عادة في بعض الجوانب الأخرى للنظرية التي تتبناها.

يجب أن يحيط العلم دائماً بأوسع نطاق ممكن من الملاحظات الرصدية، أو على الأقل أن يتوافق معه.- السؤال الحقيقي هو ما الذي يحل مجموعة كاملة من الظواهر غير المفسرة بنحو فعال. قد يتحول تفسير مطروح يبدو بسيطاً في البداية إلى آلية روب غولدبيرغ Rube Goldberg contraption، وذلك عندما يواجه مجموعة أكبر من المواضيع. في المقابل عند تطبيق تفسير يبدو معقداً من دون مبرر على مشكلة أساسية- والنظر بعدسة علمية شاملة- قد يكشف عن أناقة كامنة.

أما قلقي الآخر من استخدام نصل أوكام فهو قلق واقعي ببساطة. فالعالم أكثر تعقيداً مما قد يتخيله أي أحد منا. تبدو بعض الجزيئات والخواص غير ضرورية لأي عملية فيزيائية مهمة – على الأقل بحسب ما استنتجناه حتى الآن. ومع ذلك فهي موجودة، أي أحياناً لا يكون النموذج الأبسط هو الصحيح.

أُثيرت النقاشات حول هذا الموضوع عدة مرات في مؤتمر "مناقشات حول المادة المعتمة" Dark Matter Debates الذي أشرتُ إليه في الفصل السابق. في حديثها عن القيود التجريبية على الجسيمات غير الضرورية ولكن القابلة للاختبار، جادلت عالمة فيزياء الجسيمات ناتاليا تورو Natalia Toro بأن هناك دليلاً أكثر ملاءمةً من مبدأ نصل أوكام، وهو مبدأ أطلقت عليه "مبضع ويلسون" Wilson's Scalpel. وقد أسمته باسم الفيزيائي كين ويلسون، الذي طور إطاراً عاماً لفهم كيف نمارس العلم بتتبُّع العناصر القابلة للاختبار فقط. واقترحت ناتاليا أن مبضعاً باسمه سيُستخدم لتشكيل، وليس لحلاقة، نظرية، فتحافظ على سلامة معظم العناصر القابلة للاختبار – سواء يمكننا أن نعزو إليها غاية ضمنية أو لا. عندما تحدثتُ أنا لاحقاً، اقترحت مازحةً أن مبدأ "طاولة مارثا" Martha's Table هو فكرة أفضل. فأنت لا تُعدُّ طاولة الطعام بوضع سكاكين فقط. بل تُعدُّها بكل الأشياء الضرورية لتناول وجبة بطريقة مهذبة. بموهبة مارثا ستيوارت، ستحتفظ بمبدأ التنظيم – مهما كان عدد الأطباق والأدوات التي تُعدُّها.

العلم أيضاً في حاجة إلى طاولة مُعدَّة بنحو مناسب – طاولة تسمح لنا بأن نعالج الظواهر العديدة التي نرصدها. على الرغم من أن العلماء يميلون إلى تفضيل الأفكار البسيطة، فإنها بالكاد تُحيط بالقصة الكاملة.

كل هذا النقاش تمهيد لتقديم ما نسميه أنا وزملائي "المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً" Partially interacting dark matter، التي أدت إلى فئة نماذج "القرص المزدوج للمادة المعتمة" Double-disk dark matter، التي سأشرحها فيما يلي. تُقرُّ كلتا فئتي النماذج بأن ما تتكون منه المادة المعتمة ليس بسيطاً. ومثل جسيمات المادة العادية، قد لا تكون جسيمات المادة المعتمة جميعها واحدة. ربما كانت هناك أنواع جديدة من المادة المعتمة بأنواع مختلفة من التفاعلات، وقد تكون لها نتائج قابلة للرصد لم تشاهَد من قبل. حتى إن

تبين أن المكون المتفاعل هو جزء صغير من المادة المعتمة، فقد تكون له نتائج مهمة تؤثر في المجموعة الشمسية والمجرة. وقد يكون له أثر مهم في الديناصورات أيضاً.

المتعصبون للمادة العادية

على الرغم من أننا نعلم أن المادة العادية تُشكِّل واحداً من عشرين جزءاً من طاقة الكون وسُدس الطاقة الإجمالية التي تنقُلها المادة (وتنقل المادة المعتمة الجزء المتبقي)، مع ذلك نعتبر المادة العادية المكونَ الأساسي فعلاً. باستثناء علماء الكوزمولوجيا ينصبُّ تركيز الجميع تقريباً على المادة العادية التي ربما ظننت أنها غير مهمة وفقاً لنسبة الطاقة.

نحن بالطبع نهتم أكثر بالمادة العادية، لأننا مصنوعون منها – وكذلك العالم الملموس الذي نعيش فيه. ولكننا نوليها اهتمامنا أيضاً بسبب غناها بالتفاعلات. تتفاعل المادة العادية بالقوة الكهرومغناطيسية والقوى النووية الضعيفة والقوية – وهكذا تساعد المادةُ المرئية في عالمنا على تشكيل أنظمة كثيفة ومعقدة. ليست النجوم فقط، بل أيضاً الصخور والمحيطات والنباتات والحيوانات جميعها تَدين بوجودها للقوى غير الجذبية في الطبيعة التي تتفاعل من خلالها المادة العادية. وعلى الرغم من أن المادة العادية تحمل نسبة صغيرة من كثافة الطاقة، فإنها تؤثر في نفسها ومحيطها بطريقة ملحوظة أكثر من أي أمر عابر.

يمكن النظر إلى المادة المرئية المألوفة – أكثر من 15% في الحقيقة – على أنها النسبة ذات الامتيازات من المادة. في تجارة الأعمال وفي السياسة، تسيطر نسبة 1% من القيادات على اتخاذ القرارات والسياسات، في حين تقدم نسبة الـ 99% المتبقية دعماً وبنى تحتية لا تحظى بكثير من التقدير والعرفان- تعمل في المحافظة على المباني، وإبقاء المدن في حالة فعالة، توصيل الطعام إلى موائد الناس. بالمثل، تسيطر المادة العادية تقريباً على كل شيء نرصده، في حين ساعدت المادة المعتمة، بغزارتها ووجودها المطلق، على تكوين العناقيد والمجرات وسهلت تشكُّل النجوم، ولكنَّ لها تأثيراً محدوداً فقط على محيطنا المباشر حالياً.

بالنسبة إلى البنى المجاورة، فالمادة العادية هي التي تقبض على زمام الأمور. هي مسؤولة عن حركة أجسامنا، ومصادر الطاقة التي توجِّه اقتصادنا، وشاشة الحاسوب أو الورق الذي تقرأ عليه هذا الكتاب، وبنحو أساسي كل شيء تُفكر أو تهتم به. إذا كان لشيء تفاعلات قابلة للقياس، فهو جدير بالاهتمام، كما ستكون له تأثيرات مباشرة في أي شيء حوله.

في السيناريو المعتاد تفتقر المادة المعتمة إلى هذا النوع من التأثير والتركيب المثير للاهتمام. الافتراض السائد هو أن المادة المعتمة هي "الغراء" الذي يُبقي المجرات والعناقيد المجرية متماسكة، ولكنها تسكن فقط في سُحب عديمة الشكل حولها. ولكن ماذا إن كان هذا الافتراض غير صحيح وأن تحيُّزنا – وجهلنا، الذي هو في النهاية أصل معظم تحيزنا – هو الذي قادنا إلى هذا الدرب المُضلِّل ربما؟ ماذا إذا كان جزء من المادة المعتمة، كالمادة العادية، متفاعلاً أيضاً؟

يحتوي النموذج المعياري (القياسي) Standard Model على ستة أنواع من الكواركات Quarks، ثلاثة أنواع من الليبتونات Leptons المشحونة بما فيها الإلكترون، وثلاثة أنواع من النيوترينونات Neutrinos، ومعظم الجسيمات المسؤولة عن القوى، إضافةً إلى بوزون هيغز Higgs boson المكتشَف حديثاً. ماذا إذا كان عالم المادة المعتمة – إن لم يكن غنياً بالمثل- هو ثرياً بنحو معقول أيضاً؟ في هذه الحالة تتفاعل معظم المادة المعتمة بقدر ضئيل جداً، ولكنَّ مكوناً صغيراً من المادة المعتمة يتفاعل تحت قوى مماثلة لتلك التي تتأثر بها المادة العادية. تقدِّم البنية الغنية والمعقدة لجسيمات النموذج المعياري والراسخ عديداً من الظواهر المذهلة في العالم. وإذا كان للمادة المعتمة مكوِّن مُتفاعل، فقد يكون هذا الجزء مؤثراً أيضاً.

لو أننا كنا مخلوقات مصنوعة من المادة المعتمة، فسنكون على خطأ كبير إن افترضنا أن كل الجسيمات في المادة العادية هي من نوع واحد. ولعلنا نحن- قومَ المادة العادية- نرتكب الخطأ نفسه. نظراً إلى تعقيد النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات، الذي يصف المكونات الأساسية للمادة التي نعرفها، يبدو من الغريب أن نفترض أن كل المادة المعتمة تتألف من نوع واحد فقط من الجسيمات. لِمَ لا نفترض بدلاً من ذلك أن لجزء من المادة المعتمة قواه الخاصة؟

في هذه الحالة، تماماً كما تتألف المادة العادية من أنواع مختلفة من الجسيمات، وتتفاعل هذه اللَبِنات الأساسية بمجموعة متباينة من الشحنات، قد تتألف المادة المعتمة أيضاً من لبنات أساسية – وأحد هذه الأنواع الجديدة من الجسيمات على الأقل تدخل في تفاعلات غير جذبية. لا تتفاعل النيوترينوات في النموذج المعياري بالقوة القوية أو الكهربائية، في حين تتفاعل الأنواع الستة من الكواركات بها. بالمثل، ربما يتفاعل نوع واحد من جسيمات المادة المعتمة تفاعلات ضعيفة أو لا يتأثر بالجاذبية، ولكن جزءاً منها – ربما 5% مثلا- يتفاعل بالفعل. بالاستناد إلى ما رأيناه في عالم المادة العادية، ربما كان هذا السيناريو أكثر ترجيحاً من الافتراض المعتاد بوجود جسيم وحيد غير متفاعل أو ضعيف التفاعل يؤلف المادة المعتمة كلها.

في العلاقات الأجنبية، يرتكب الأفراد الخطأ نفسه عندما يدمجون الثقافات المتنوعة لدولة أخرى معاً، وينظرون إلينا كثقافة واحدة مفترضين أنه- على العكس من مجتمعنا- لا يوجد أي تنوع في هذه المجتمعات. تماماً مثلما لا يَفترض المفاوض البارع تفوق قطاع في المجتمع على غيره عندما يحاول وضع الثقافات المختلفة على أساس متكافئ، يجب ألا يفترض العالِم غير المتحيز أن المادة المعتمة ليست مثيرة للاهتمام مثل المادة العادية، وأنها تفتقر بالضرورة إلى تنوع شبيه بتنوع مادتنا.

بدأ الكاتب العلمي كوري باول Corey Powell- عندما كتب عن بحثنا في مجلة ديسكوفر Discover- مقالته بإعلانه أنه "متعصب للمادة الخفيفة"، ومشيراً إلى أن الجميع قد يكونون كذلك أيضاً. وقد عَنى بذلك أننا نرى نوع المادة التي نألفها هو الأهم، ومن ثم هو الأكثر تعقيداً وإثارة للاهتمام. إنه نوع الاعتقاد الذي ربما ظننتَ أن ثورة كوبرنيكوس قد أطاحت به. مع ذلك يصر معظم الناس على افتراض أن منظورهم واعتقادهم بأهميتنا يتوافقان مع الواقع في العالم من حولنا.

للعناصر المختلفة من المادة العادية تفاعلاتٌ مختلفة، وتساهم في العالم بطرق مختلفة. كذلك قد تتألف المادة المعتمة من جسيمات مختلفة، بسلوكيات مختلفة، وقد تؤثر في بنية الكون بطريقة قابلة للقياس.

الأقلية المتفاعلة

أطلقنا- أنا وزملائي- على السيناريو الذي يفترِضُ وجود مكون صغير من المادة المعتمة يتفاعل بقوى غير جذبية "المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً". أولاً درسنا أبسط نموذج له، وهو يتضمن عنصرين فقط. يتفاعل العنصر السائد جذبياً فقط وهو المادة المعتمة الباردة التقليدية التي تُوجد في الهالات الكروية حول المجرات والعناقيد المجرية. يتفاعل العنصر الآخر جذبياً أيضاً، ولكن بقوة إضافية تشبه الكهرومغناطيسية إلى حد كبير.

قد يبدو هذا السيناريو ثنائي الطبقات غريباً، ولكن تذكرْ أن مثل هذه الملاحظات قد تنطبق أيضا على المادة العادية. تتفاعل الكواركات مع قوة نووية قوية على عكس الجسيمات كالإلكترونات. لهذا السبب ترتبط الكواركات بالبروتونات والنيوترونات على عكس الإلكترونات. بالمثل تتفاعل الإلكترونات مع كهرومغناطيسية لا تختبرها النيوترينوات. لذا إذا تمردنا على تعصُّبنا المعتاد، وسمحنا بمثل هذا التنوع في العالم المعتم، فلن يكون من المستحيل تخيُّل أن جزءاً من القطاع المعتم يتفاعل بقوى مشابهة- ولكن متميزة – للقوى التي تتفاعل من خلالها الأشياء التي صُنِعنا منها.

لكن تذكرْ أن المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً تختلف بعضَ الشيء عن مادة النموذج المعياري من حيث إنه على الرغم من أن الإلكترونات لا تتفاعل مع القوى القوية بنحو مباشر، فإنها تتفاعل مع الكواركات ومن ثم تختبر تأثيرات غير مباشرة. قد يكون الشكل الجديد المقترَح للمادة المعتمة معزولاً تماماً في تفاعلاته، مع احتمال أن كتلة المادة المعتمة لا تختبر تأثيرات غيرَ مباشرة للقوة المعتمة المقترحة حديثاً. ولأننا لا نعلم بعد ما إذا كانت مكونات المادة المعتمة تتفاعل – أو إذا كانت المادة المعتمة تتألف من أنواع مختلفة من الجسيمات – فإن أول وأبسط افتراض هو أنه لا توجد تفاعلات جديدة أخرى عدا الشكل الجديد للكهرومغناطيسية، وفقط الجسيمات المشحونة المقترحة حديثاً التي تختبر هذه القوة. في هذا السيناريو لن تتأثر كتلة المادة المعتمة بأي قوة جديدة على الإطلاق.

على سبيل التسلية سأدعو القوة التي تختبرها مكونات المادة المعتمة المتفاعلة بالضوء المعتم Dark light، أو بنحو أعم سأدعوه الكهرومغناطيسية المعتمة Dark electro-magnetism. اخترنا المصطلحات لتُذكرنا بأن النوع الجديد من المادة المعتمة يتفاعل مع قوة مثل القوة الكهرومغناطيسية – ولكنها قوة لا ترصدها المادة العادية في عالمنا. بينما تحمل المادة العادية شحنة بحيث ترسل وتمتص الفوتونات، سيرسل ويمتص هذا المكون المقترح حديثاً من المادة المعتمة هذا النوع الجديد من الضوء المعتم، الذي لا تتفاعل معه المادة العادية.

ستكون هذه القوة الكهرومغناطيسية المعتمة مشابهة للقوة الكهرومغناطيسية العادية. ولكن سيكون تأثيرها مختلفاً تماماً في الجسيمات المشحونة تحت قوة إضافية مميزة تُنقَل عن طريق نوع جديد كلياً من الجسيمات – فوتون معتم Dark photon إن شئت. على الرغم من أن المكوِّن الجديد للمادة المعتمة لن يتفاعل مع المادة العادية، ستكون له تفاعلات ذاتية تجعله يتصرف مثل المادة العادية المألوفة التي، في النهاية، لا تتفاعل مع المادة المعتمة أيضاً.

ستحمل كل من المادة العادية والمادة المعتمة شحنة، وتتفاعل مع قوى، ولكن ستكون هذه القوى والشحنات مُميَّزة عما سواها. ستجذب الجسيمات القوة المعتمة الجديدة التي يحمل بعضها –بعضاً- أو تتنافر- بطريقة مشابهة لسلوك جسيمات المادة العادية المشحونة. ولكن تفاعلات القطاع المعتم ستكون شفافة بالنسبة إلى المادة العادية ما دامت المادة المعتمة تتفاعل بضوئها الخاص والفريد – وليس بالضوء الذي نَألفه. فقط جسيمات المادة المعتمة ستتأثر بالقوة الجديدة.

حتى إن كانت تنصاع لقوانين الفيزياء المماثلة وتوجد متقاربةً بعضها من بعض، فستحتل كل من المادة العادية والمادة المعتمة عالمها الخاص. وستتداخل المادة المعتمة والمادة العادية مادياً من دون أن تتفاعلا. لأنهما ستتفاعلان كلتاهما مع الأخرى بقوى مميزة – عدا التأثير التجاذبي الضعيف، ستكون المادة المعتمة والمادة العادية المشحونتان غافلتين كلٌّ منهما عن الأخرى.

إن وجود نوعين من الشحنات المشحونة كهرومغناطيسياً في المكان نفسه من دون أن يتفاعلا ليس بالأمر الغامض. الأمر أشبه بكون المادة العادية تتفاعل عبر الفيسبوك، في حين يتفاعل نموذج المادة المعتمة المشحونة المتفاعلة جزئياً عبر غوغل بلس. تفاعلاتُهما متشابهة، ولكنهما في تواصل فقط مع من في شبكتهما الاجتماعية. وتحدث التفاعلات على إحدى شبكتَي التواصل الاجتماعي – ولكن ليس على كلتيهما.

للاستعانة بصورة تشبيهية من مجال آخر، إنهما مثل البرامج التلفزيونية لليمين المتطرف واليسار المتطرف، التي تتبع تقريباً قواعد البرمجة نفسها، ويمكن أن تُبَث على تلفزيون واحد، ولكنها كينونات مستقلة مختلفة تماماً – تعزز كل منها تحيزاتها. وعلى الرغم من أن لديها نماذج متشابهة، مع مضيف المقابلة، وضيف "خبير"، وعروض تقديمية تشرح وجهات النظر، وعرض شريط إخباري في الأسفل عن مواضيع عشوائية غير مترابطة، على رغم ذلك كله فإن المحتوى الفعلي والنتائج، إضافةً إلى المعلنين لهذين النوعين من البرامج، مختلفة جداً. قلة قليلة من الضيوف أو المواضيع ستظهر على البرنامجين المختلفَين، كما سيكون المرشحون والمنتخبون مختلفين أيضاً.

كما أن من النادر أن نجد أفراداً يتابعون فوكس نيوز ويستمعون إلى القناة NRP، معظم الجسيمات، أو ربما كلها، تتفاعل بقوة أو أخرى. ويشجع النموذج – مثل الإعلام – الالتزام بوجهة نظر واحدة. وإن كان من حيث المبدأ يمكن أن تكون هناك جسيمات وسيطة تتفاعل عن طريق قوى لكل من النوعين، فإن معظم الجسيمات تحمل نوعاً واحداً أو آخر من الشحنة ومن ثم لا تتفاعل بعضُها مع بعض.

من باب الإنصاف لم يكن التحيز فقط هو ما ثبَّط علماء الفيزياء عن التفكير في نوع جديد من الكهرومغناطيسية التي قد تتأثر بها المادة المعتمة. للتفاعلات نتائج يمكن اختبارها في العادة. ابتعد علماء الفيزياء عن فكرة القوى المعتمة والمادة المعتمة ذاتية التفاعل لأنهم ظنوا أن مثل هذه السيناريوهات مقيدة أو حتى مستبعدة. لكن، بحسَب ما شُرح في الفصل الثامن عشر، حتى إن كانت المادة المعتمة كاملةً تتفاعل مع هذه القوى، فإن هذه القيود ليست صارمة جداً. ولكن التفاعلات مسموح بها فقط ضمن حدود مفروضة استناداً إلى الملاحظات الرصدية.

لكن الوضع أقل تقييداً بكثير إذا تفاعل جزء صغير من المادة المعتمة تفاعلاً ذاتياً. تذكرْ نوعي القيود على التفاعل الذاتي. الأول له علاقة ببنية الهالات بحد ذاتها: يجب أن تكون كروية – مع القليل من عدم الانتظام الذي يُعرَف بالبنية ثلاثية المحاور. ويتعلق الثاني باندماجات العناقيد المجرِّية، مثل أكثرها شهرة: عنقود الطلقة الذي كان نتيجة اندماج عناقيد مجرِّية. يبقى الغاز بنحو ملحوظ في المنطقة المركزية، في حين تمر المادة المعتمة، المرصودة بفعل تأثير عدسة الجاذبية، من دون عرقلة لكي تشكل بنيتين منتفختين خارجيتين – تشبهان أُذنَي ميكي ماوس قليلاً.

كلا القيدين مهمٌ عندما تتفاعل المادة المعتمة كاملةً. ولكنَّ أياً منهما لا يخبرنا بكثير عما إذا كان المكون المتفاعل يؤلف جزءاً صغيراً من المادة المعتمة. فإذا تفاعل مكون صغير فقط، فإن معظم الهالات ستكون كُروية. أيضاً لن تمحو التفاعلات المتبادلة البنية ثلاثية المحاور Triaxial structure إلا إذا كان هو العنصر السائد، أو أنه يبدد أكثر مما هو متوقع.

بالمثل تكون أجزاء الغاز والمادة المعتمة في عنقود الطلقة غيرَ مَقِيسة بنحو كافٍ لتسجيل مكون ضئيل من المادة المعتمة، التي تؤلف، في النهاية، جزءاً صغيراً فقط من العنقود المجري. قد يتفاعل هذا المكون ويبقى في المنطقة المركزية مع الغاز – من دون أن يدرك أحد وجوده. ربما ستصبح المقاييس، في النهاية، مثل عنقود الطلقة، دقيقة بما يكفي لكي تقيد سيناريو التفاعل الجزئي الذي أشرحه. من المؤكد حالياً أن فرضية المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً تظل فرضيةً واعدة قابلة للتطبيق.

الشرارة

لم يكن دافعي وراء وضع هذه الفكرة – مع ماثيو ريس، إضافةً إلى شابة في كلية الفيزياء في هارفارد، وباحثَين بعد الدكتوراه، جيجي فان وأندريه كاتز – هدفاً مباشراً تماماً. كما حال عديد من المشروعات البحثية الأخرى التي يتبين أنها أكثر إثارة للاهتمام، لم نكن نهدف في البداية إلى دراسة ما أصبح أخيراً تركيزنا الرئيس. بل كنا نحاول أن نفهم بعض البيانات المثيرة للاهتمام من قمر فيرمي الاصطناعي – مرصد ناسا الفضائي الذي يمسح السماء بحثاً عن أشعة غاما، التي هي نوعٌ من الضوء أكثر حيوية من الضوء المرئي أو حتى الأشعة السينية.

تنتج معظم العمليات الفيزيوفلكية إشعاعاً بتوزيع منتظم على نطاق واسع من الترددات، بمعنى أن عدد الفوتونات لا يتغير بقدر كبير عند أي طول موجة بنحو خاص. لذا عندما لاحظ كريستوف وينغر Christoph Weniger من جامعة أمستردام وزملاؤه فيضاً من الإشعاع في بيانات فيرمي متركزاً بالكامل في تردد واحد، أشعل ذلك شرارة اهتمامنا – واهتمام كثيرين في مجتمعات العلوم الفلكية والفيزيائية.

بدا أن الارتفاع Spike في كثافة الإشعاع (هنا تعني كلمة إشعاع فقط الفوتونات أو الضوء) الذي شهده وينغر وشركاؤه ناشئٌ من مركز المجرة، حيث تتركز المادة المعتمة بكثافة أقل، ولكن لم تكن هناك إشارة من المصادر الفيزيائية الفلكية العادية. في غياب أي تفسير تقليدي – أو خطأ في القياس – يمكن أن يمثل ارتفاعُ عدد الفوتونات شيئاً جديداً.

كان الاقتراح الأكثر إثارة للاهتمام هو أن الإشارة نتيجة مادة معتمة تتحلل إلى فوتونات – إشارة التقاط غير مباشرة شُرحت في الفصل السابع عشر. ربما اصطدمت جسيمات مادة معتمة بعضها مع بعض وبالمعادلة "السحرية": $E = mc2$، تحولت إلى فوتونات تمكن قمر فيرمي الاصطناعي من التقاطها. ما دعم هذا الاقتراح أيضاً هو أن طاقة الفوتونات المرصودة كانت ضمن المجال المتوقع للمادة المعتمة. كما كانت قريبة بقيمتها أيضاً من كتلة بوزون هيغز – كتلة القطعة الناقصة المكتشفة حديثاً في النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات – ما يشير ربما إلى ارتباط أعمق. كان الجانب الثالث المثير للاهتمام في هذا القياس هو أن معدل التفاعل يتوافق مع ما هو مطلوب للحصول على الكثافة الباقية من المادة المعتمة. تماماً الكمية المناسبة من المادة المعتمة التي ستبقى حالياً لو أنها تحللت بالمعدل الذي تم قياسه.

ولكن على الرغم من هذه العلامات المتفائلة، بدت بعض الأشياء غير منسجمة إذا كانت الإشارة فعلاً ناشئة من المادة المعتمة. المادة المعتمة لا تُنتج الفوتونات بنحو مباشر لأنها لا تتفاعل مع الضوء. ربما تتفاعل المادة المعتمة مع جسيمات مشحونة ثقيلة لم نرصدها بعد، وهذه الجسيمات تتفاعل بدورها مع الضوء. ولكن لو كان الأمر كذلك، لكنا توقعنا ذلك عندما تتحلل المادة المعتمة وتتحول إلى طاقة، ستُنتج تلك الطاقة جسيمات مشحونة أيضاً. ولكن قمر فيرمي الاصطناعي لم يلتقط أيَّ إشارة عن هذه العملية.

أما المشكلة الأخرى فهي أنه على الرغم من أن الكمية الإجمالية للمادة المعتمة تعتمد على مدى تحلُّلها إلى أي شيء، تعتمد الإشارة فقط على الكمية التي تتحللها إلى فوتونات، نظراً إلى كثافة المادة المعتمة في الكون، يتبين أن معدل الإفناء إلى فوتونات ضئيل جداً في كل النماذج المكيفة بشكل دقيق. هذا يعني أن تفسير الإشارة هذا للمادة المعتمة يمكن أن يكون مترابطاً فقط ضمن نطاق ضيق جداً من المقاييس التي تسمح بمعدل كبير بما يكفي من الإفناء إلى فوتونات، ولكن من دون إفناء إلى جسيمات مشحونة قابل للقياس. لم يبدُ أي سيناريو منطقي سيجعل هذا ممكناً.

وجدنا أنا ومات وجيجي وآندريه الأمر فرصةً سانحة لاستكشاف نطاق نماذج المادة المعتمة المسموح به. أردنا أن نعرف إن كان هناك مثال منطقي تتوافق فيه معظم المعدلات مع قيمها المَقيسة. بدأنا بالتركيز على نتائج فيرمي والسؤال عن إمكانية التفكير بطريقة تستطيع بها الطبيعة أن تقدم أفضل من النماذج التي اقترحها الفيزيائيون. كانت نتائج فيرمي مذهلة، ولكنها لم تكن قوية بما يكفي لطرح قضية تُبرهن على إشارة جديدة – بمنشأ من المادة المعتمة أو غيرها. ربما عكست الملاحظات الرصدية مصادفة إحصائية أو سوء فهم للأداة، بدلاً من إشارة حقيقية عن عملية فيزيائية جديدة، التي – للحيلولة دون أي توقعات مبالغ فيها عند قراءتك لهذا – تبين أنها كذلك.

ولكن الملاحظة كانت مثيرة بما يكفي بحيث سمحت، من البداية، بالسؤال عما إذا كانت هناك عملية فيزيائية منطقية يمكنها أن تعللها. في المحصلة إن البحث عن أشكال جديدة وغريبة من المادة هو أمر صعب جداً. ويجب أن نكون مدركين لأي طريقة ممكنة للعثور عليها. سواء تبين أن هذه الإشارة صحيحة أو لا، ربما سنتعلم شيئاً يمكن أن يكون مفيداً في المستقبل.

عملنا نحن الأربعة على السبورة في مختبري، وجربنا عدداً من الأفكار المصممة لتفادي المشكلات والاحتفاظ بالسمات المرغوب فيها للإشارة. ولكن لم ينجح أي من اقتراحاتنا بقدر يستحق المتابعة. كانت الأفكار التي نجحت بالالتزام بمعظم القيود غير متناغمة مع مبدأ نصل أوكام. الأسوأ من ذلك، لن تكون مسموحاً بها في أي مكان على محيط طاولة أفكار مجهزة بنحو ملائم.

لكن دفعتنا إحدى الأفكار التي رفضناها إلى طريقة تفكير كانت في النهاية هي الأكثر إثارة من أي شيء خططنا للاضطلاع به. كانت تساؤلاتنا الأولية تعتمد على محاولة إيجاد نموذج معين يمكننا أن نجعله يتسع ضمن القيود القائمة. ولكننا رجعنا خطوة إلى الوراء وسألنا أنفسنا: ماذا إذا كانت المادة المعتمة المحلية أكثر كثافة مما ظننا بحيث كنا في الواقع نسيء تفسير النتائج؟ ماذا إذا كانت المادة المعتمة تستطيع أن تتحلل أكثر مما كنا نتوقع بسبب هذه الطاقة الأكبر؟

مع الكثافة الأعلى يمكن أن تجد جسيمات المادة المعتمة بعضها بعضاً، وتتفاعل بنحو أكثر فاعلية. هذا بدوره سيولِّد إشارة أكبر تتوافق مع الملاحظات بقدر أكبر. تماماً مثلما هو مرجح أن تصادف أحداً في "محطة بين" Penn Station بنيويورك في ساعة الذروة أكثر من أن تصادفه في محطة ووتربري بفيرمونت في الساعة التاسعة من صباح يوم أحد، يكون من المرجح أن يتفاعل جسيم مادة معتمة مع جسيم آخر في بيئة مادة كثيفة أكثر من أن يتفاعل في بيئة مُخلخلة عادية في الهالة عديمة الشكل. لو كان بعض المادة المعتمة متركزاً أكثر من بقية المادة في الهالة، يمكن عندها تحقيق معظم القيود الأخرى بسهولة أكبر.

السؤال عندها هو السبب الضمني. لمَ قد تكون المادة المعتمة – أو على الأقل بعض المادة المعتمة- أكثرَ كثافة مما اعتقدنا؟ من هنا ظهرت فكرة المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً – مع فكرة قرص المادة المعتمة Dark-disk idea الذي سيتبع قريباً. في الواقع حتى إن كنا الآن واثقين تماماً بأن إشارة فيرمي زائفة، كانت لهذه الفكرة الجديدة نتائج عديدة غير مكتشَفة جعلتنا ندرك أنها تستحق المتابعة بنحو مستقل. إحدى هذه النتائج قرص مادة معتمة بكثافة أكبر بكثير مما سبق افتراضه.

القرص المعتم

عندما كنتُ أنظف منزلي ذات مرة (حسناً، كنت أترك المكنسة الكهربائية الروبوتية رومبا لتأدية ذلك)، أفرغتُ علبة الغبار ووجدتُ ورقة كعكة حظ قديمة كنت قد احتفظت بها. كانت في الورقة أحجية: "ما سرعة العتمة؟". لم أعلم حينها أن الكلمات كانت تتنبأ نوعاً ما بما سيأتي، من حيث إنها تنبأت بنحو أو بآخر بمشروع البحث الذي كنت على وشك أن أبدأه.

شرح الفصل الخامس كيف أن المادة العادية توجد في قرص رفيع وكثيف لأنه يبدد الطاقة، وذلك ببث فوتونات تبعثر الطاقة بنحو فعال. والنتيجة الناشئة من تبعثر الطاقة هي جسيمات مادة أبطأ وأبرد لا يمكنها القيام برحلة طويلة كما هو متوقع من الجسيمات الأكثر سخونة وطاقة وسرعة. ويحدث انهيار المادة لأنه مع الطاقة الأقل تصبح لديها سرعة Velocity أقل من أن تمكنها من الانتشار. وهكذا تنهار المادة العادية، التي تبعثر الطاقة ومن ثم تبطئ من سرعتها، إلى قرص – مثل قرص درب التبانة–يمكنك أن تراه في ليلة صافية وجافة.

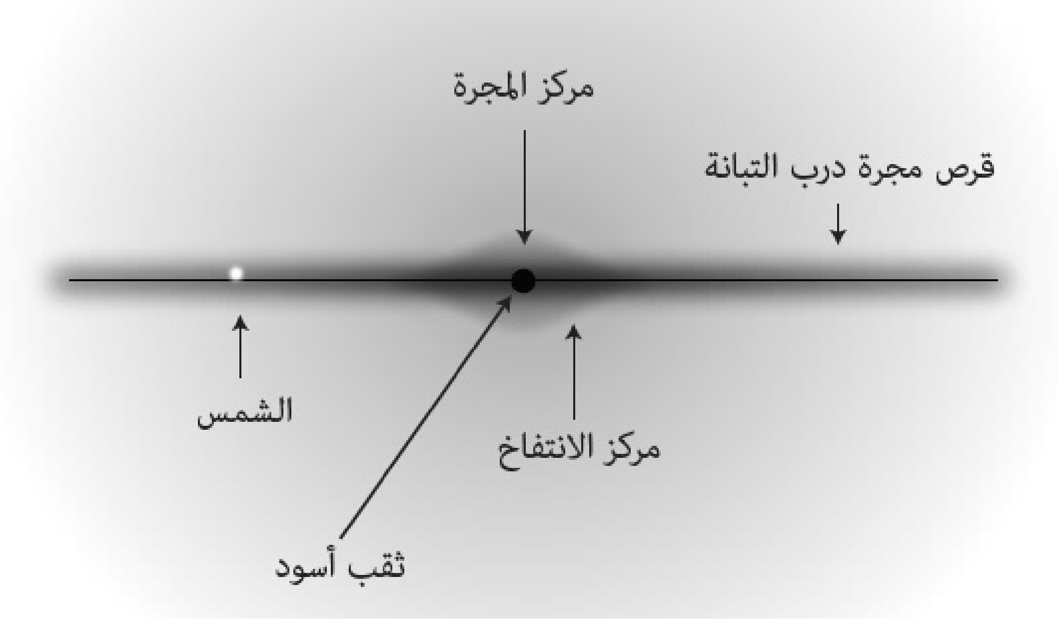
بعد أن أطلقنا أنا وزملائي عنان فكرة المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً، تتبعنا نتائجها المحتملة على مجرة درب التبانة وما وراءها. افترضنا أن المادة المعتمة المتفاعلة موجودة، وأنها تتصرف بنحو مماثل للمادة العادية المشحونة، التي نعلم أنها تبرد في المجرة، وتتباطأ، ومن ثم تشكِّل قرصاً.

في هذا السيناريو يتفاعل جزء صغير فقط من المادة المعتمة. لذا فإن إجمالي المادة المعتمة سيشكل هالة كروية، تنسجم مع ما رصده علماء الفلك حتى الآن. ولكن المكون الجديد المتفاعل من المادة المعتمة يمكنه أن يبعثر الطاقة، ومن ثم يمكنه – كالمادة العادية – أن يبرد ويشكل قرصاً أيضاً. سيبدد مكونُ المادة المعتمة المتفاعل – عن طريق تفاعلات الفوتونات المعتمة – الطاقةَ ويقلل من سرعتها. وسيتصرف في هذا الخصوص بنحو مشابه جداً للمادة العادية. تماماً مثلما تبرد المادة العادية وتنهار، سيفعل مكون المادة المعتمة

المتفاعل ذلك أيضاً. وبسبب الزخْم الزاوي المحفوظ Conserved angular momentum، الذي يمنع الانهيار بالاتجاه العمودي، ستنهار المادة المعتمة المتفاعلة إلى قرص.

إضافةً إلى ذلك، تماماً مثلما تتألف ذرات المادة العادية من بروتونات وإلكترونات بشحنات متناقضة، سيحتوي هذا المكون من المادة المعتمة على جسيمات متعاكسة الشحنة. ستستمر الجسيمات المشحونة في بعثرة الطاقة إلى أن تصبح باردة بما يكفي لكي ترتبط في ذرات معتمة. سيصبح التبريد عندها أبطأ بكثير، وستتجمع الذرات المعتمة، مثل ذرات المادة العادية، في قرص يرتبط سُمكه بدرجة الحرارة التي يحدث عندها الارتباط الذري. وبوضع افتراضات معقولة، يجب أن تكون درجة حرارة المادة العادية ودرجة حرارة مكون المادة المعتمة بعد توقف التبريد متقاربة. لذلك يبقى لدينا قرص من المادة المعتمة وقرص من المادة العادية بدرجتي حرارة متقاربتين في القرصين.

ولكن بنية القرص المعتم لن تكون مثل بنية قرص درب التبانة المألوف. في الواقع قد تكون أكثر إثارة للاهتمام. الخاصية المميزة للقرص المعتم هي أنه إذا كان جسيم مادة معتمة أثقل من البروتون ولكن له درجة الحرارة نفسها، فسيكون القرص المعتم أرفع - أضيق عرضاً من قرص درب التبانة. ترتبط الطاقة التي يحملها جسيم بدرجة حرارته. ولكن الطاقة الحركية Kinetic energy ترتبط أيضاً بالكتلة والسرعة. ستكون الجسيمات الأثقل التي لها درجة الحرارة نفسها بسرعة أقل لكي تكون الطاقة متماثلة تقريباً، إذن فإن الكتل الأكبر تؤدي إلى أقراص أرفع. أما جسيم مادة معتمة بكتلة أثقل من البروتون بنحو مئة ضعف - قيمة مفترضة عموماً لكتل المادة المعتمة - يمكن أن يكون القرص أرفع من قرص درب التبانة الرفيع بنحو مئة ضعف - إمكانية مدهشة، والتي، كما سنرى في الفصلين المقبلين، يمكنها أن تقدم نتائج رصدية مثيرة للاهتمام. (انظر: الشكل 38).



[الشكل 38] مكون متفاعل صغير من المادة المعتمة يمكن أن يؤدي إلى قرص معتم رفيع جداً في مستوى درب التبانة، يظهر في الشكل كخط أسود.

المهم أيضاً أن القرصين، على الرغم من اختلافهما، يجب أن يكونا مع ذلك متراصفين - والقرص المعتم مغروس في مستوى قرص درب التبانة الأعرض. ذلك لأن قرصي المادة المعتمة والمادة العادية، اللذين يتفاعلان بالجاذبية، غير مستقلين بالكامل. بعد تأمل القصور في تشبيه فوكس نيوز وقناة NPR، سيجعل الشد التجاذبي الذي يتعرض له قرصا المادة المعتمة والمادة العادية كلتا الكينونتين ترغبان في توجيه أنفسهما إلى اتجاه

واحد. على الرغم من أن برامج التلفاز اليمينية واليسارية ليست مستقلة بالكامل؛ لأنها تؤثر بعضها في بعض بالتأثير المشترك لبثهما المتكرر عادة والثابت، معظم ردود الأفعال سلبية، ما يجعل تفاعلهما المشترك تنافرياً. في المقابل يتفاعل قرصا المادة المعتمة والمادة العادية عن طريق الجاذبية ومن ثم يرتصفان.

كانت إحدى نتائج بحثنا المفاجئة والمدهشة هي أنه يمكن أن يكون هناك قرص رفيع من المادة المعتمة مع قرص المادة العادية – وأن هذا القرص الجديد المقترح للمادة المعتمة يمكن أن ينغرس داخل قرص درب التبانة المعروف. كنت أنا وزملائي متحمسين لهذا الاقتراح، ومتلهفين لمشاركته مع علماء الفيزياء الآخرين. أُعجب زميلي هاورد جورجي Howard Georgi في هارفارد بالفكرة كثيراً أيضاً، ولكنه فكر بحكمة أن هذا السيناريو استحق اسماً لامعاً أكثر من أي شيء سبق أن اقترحناه. فقدم لنا معروفاً إضافياً باقتراحه الاسم البديل "المادة المعتمة ثنائية القرص" Double disk dark matter (اختصاراً: المادة DDDM)، الذي خدم هدفنا ودأبنا على استخدامه منذئذٍ. المصطلح ملائم لأن المجرة، بحسَب افتراضاتنا، تحتوي فعلاً على نوعين من الأقراص، أحدُهما مغروس داخل الآخر.

تشير أرصاد النجوم إلى أننا تركنا مركز المستوى منذ أقل من عدة ملايين سنة – مدة قصيرة بحسَب المقياس الزمني الكوني. هذا يخبرنا أنه في حال وجود المادة المعتمة ثنائية القرص فعلاً، ستتذبذب المجموعة الشمسية خلال القرص المعتم نحو ذلك الزمن أيضاً. إذن نحن لسنا بعيدين جداً (من ناحية فيزيائية فلكية). في الواقع إذا تبين أن القرص أسمكُ بقليل، قد نكون في داخله – ربما مع نتائج قابلة للرصد. وكما سنرى قريباً، سيؤثر القرص أيضاً على ديناميكيات المجموعة الشمسية – ربما بتأثيرات دراماتيكية، وإن كانت على مقياس زمني طويل. يمكن أن يصنع المكون الصغير المتفاعل من المادة المعتمة أيضاً أقراصاً داخل مجرات أخرى – مما يفسر ربما بعض خواصها أيضاً.

بالطبع السؤالُ الكبير هنا هو عما إذا كان المكون المتفاعل من المادة المعتمة والقرص المعتم موجودَين حقاً. سيساعد اكتشاف قرص معتم بقياس نتائجه في إثبات أهمية أي من الاقتراحات أعلاه. من حسن الحظ، مثل المادة العادية، حتى إن كان جزءاً صغيراً من إجمالي المادة المعتمة في الكون، يمكن أن تسهل الكثافة الزائدة للمكون المتفاعل عملية إيجاده وتحديده أكثر من المادة المعتمة المعتادة المنتشرة في الهالات. سيخبرنا عديد من العلامات في الفيزياء الفلكية وفيزياء الجسيمات المقترنة بهذه الكثافة الزائدة للمادة المعتمة، التي سيناقشها الفصل المقبل، بما إذا كانت فكرة القرص المعتم قابلةً للتطبيق أو أنها مفضلة على الأقل.

شاركت أخيراً في نقاش محتدم مع محامين وأكاديميين وكتّاب وناشطين في حقوق الإنسان حول موضوع حرية الكلمة. لم يشكك أيٌّ منا في أهمية حرية الكلمة. ولكننا لم نتفق على ما يجب أن تعنيه، أو كيف علينا أن نوازنها في سياق الحقوق الأخرى. متى تطغى النتائج الضارة المحتملة لحرية الكلمة على فوائدها؟ هل يجب تقييد إنفاق المال للترويج لقانون أو مرشح معين بأي طريقة؟ شرَح محامٍ كيف اعتمدت المحكمة العليا في الولايات المتحدة على حق حرية الكلمة– إضافةً إلى إنفاق المال كشكل من أشكال التعبير– لتحكم في قضية "المواطنون متحدون" Citizens United case، التي تسمح بالمساهمات السياسية غير المقيدة من المؤسسات. ولكن كان آخرون في نقاشنا قلقين من أن الإنفاق غير المقيد للمؤسسات من شأنه أن يطمس أصوات المواطنين الأفراد– مجادلين أيضاً بأن حرية الكلمة المقصودة هي مخصصة للأفراد وليس للمؤسسات. ففي المحصلة لا المال ولا المؤسسات تستطيع الكلام– بحرية أو من دون حرية– بغير صوت بشري.

ولكن قرار المحكمة العليا قال كلمته، ومع فيض الأموال التي تتدفق الآن على السياسة دعونا نتأمل الطرق المختلفة التي يستطيع بها الأفراد– والمؤسسات– إنفاق أموالهم لتحفيز الرأي العام.

يمكن تركيز المساهمات المالية لتكثيف الإعلان في المناطق المحلية كالمدن والبلدات، حيث يمكن للإعلام تغيير آراء الناس بسهولة، وأن يؤثر في نتيجة التصويت. أو يمكن أن يساهم المتبرعون بنحو أكثر سخاء، منفقين ثرواتهم للدعاية لمطالبهم على نطاق أوسع– مما ينتج عنه قولبة عامة للرأي، ولكنه يكون محدود التأثير. وسيكون حظ الاستراتيجيتين في النجاح أكبر إذا طُبقتا معاً مما لو طبقت كل منهما على حدة. ولكن يجب أن يكون معدل التغيير أكبر في المناطق المستهدفة، مما يعكِس بوضوحٍ الكثافة الأعلى للإعلان الموجَّه في السياق المحلي الأصغر، ولكن الأكثر تركيزاً.

بالمثل في الفيزياء، سيكون تأثير جاذبيةٍ قرص Disk أرفعَ وأكثفَ هو أقوى على النجوم من القرص الأكثر سُمكاً وتخلخلاً. مثل الإعلان المحلي الأكثر تأثيراً في النطاق المحلي، تتأثر مواقع وسرعات النجوم التي تتحرك داخل وخارج المستوى المجري Galactic plane بالقرص الأرفع والأكثر كثافة أكثر.

لأن درب التبانة سيحتوي على قرصين من المادة العادية والمادة المعتمة، ستعتمد حركة النجوم داخل وخارج المستوى المجرِّي على كليهما، حيث يولدان تأثيراً مشتركاً يختلف بشدة، ثم تدريجياً، مع الابتعاد عن المنطقة الكثيفة في المستوى الأوسط للمجرة– مثل تأثير النتائج المتحصلة عند الإعلان على نطاق محلي وعلى نطاق أوسع معاً. مع قرص معتم نحيف مغروس في قرص مادة عادية أكثر سُمكاً، سينضم الجذب Pull المُركَّز للمادة المعتمة مع الجذب المُخلخَل للمادة العادية لينجم عنه تأثيرٌ -في النجوم- قابل للقياس ويتباين وفقاً لبعدها عن المستوى الناصف Midplane لمجرة درب التبانة.

نحن نعيش في حقبة غنية بالبيانات، وحتماً لا نريد أن نُغفل أي هدف بحثي ممكن– خاصة عند البحث عن شيء مذهل ولكن مراوغ كقرص من المادة المعتمة. سيشرح هذا الفصل كيف سيساعد قياسُ تأثيرِ جاذبيةٍ قرص درب التبانة باستخدام حركة النجوم في إثبات أو نفي وجود القرص المعتم. ولكن قبل أن نتناول ذلك، سيستعرض هذا الفصل أولاً اعتبارات عامة أخرى حول احتمالات وجود قرص من المادة المعتمة، واحتمال أن يكتشفه عددٌ من الأبحاث التقليدية التي لا تزال جارية. بعد ذلك، سيستعرض الفصلُ بعض النتائج الفيزيائية الفلكية المثيرة للقرص المعتم.

مادة معتمة متنوعة

عند دراسة المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً في البداية، ذَهلِتُ عندما أدركت أن أحداً لم يفكر في المغالطة المحتملة – والعجرفة – في افتراض أن المادة العادية هي فقط التي لديها تنوُّع في أنواع الجسيمات والتفاعلات. على الرغم من أن قلة من الفيزيائيين حاولوا تحليل نماذج مثل نموذج معروف باسم "المادة المعتمة المنعكسة" [صورة المرآة] Mirror dark matter الذي يفترض وجود مادة معتمة تحاكي كل تفاصيل المادة العادية، نماذج كهذه كانت مُحدَّدة وغرائبية. وكانت نتائجها صعبة التوافق مع كل شيء نعرفه.

درس مجتمع صغير من الفيزيائيين نماذج أكثر شمولاً تنظر في المادة المعتمة المتفاعلة. ولكن حتى هؤلاء افترضوا أن معظم أنواع المادة المعتمة كانت واحدة ومن ثم تتأثر بالقوى نفسها. لم ينظر أحد في احتمال أنه وإن كانت المادة المعتمة لا تتفاعل، فربما يتفاعل جزء صغير منها فقط.

أحد الأسباب الواضحة هو أن معظم الناس سيتوقعون أن تكون المادة المعتمة غير مرتبطة بمعظم الظواهر القابلة للقياس بصورة خاصة إذا كان المُكوِّن الإضافي لا يشكِّل إلا جزءاً صغيراً فقط من المادة المعتمة. ولأننا لم نرصد حتى العنصر السائد في المادة المعتمة، فقد يكون من السابق لأوانه الاهتمام بالعنصر الأصغر.

ولكن عندما تتذكر أن المادة العادية تُشكِّل 20% فقط من طاقة المادة المعتمة- وعلى الرغم من ذلك فإنها بنحو أساسي كل ما ستحوز اهتمام معظمنا- –يمكنك أن ترى أين الخطأ في هذا المنطق. يمكن أن تكون المادة التي تتفاعل بقوى غير قوة الجاذبية أكثر إثارة للاهتمام وأكثر تأثيراً من كمية أكبر من المادة المتفاعلة تفاعلاً ضعيفاً.

رأينا أن هذا ينطبق بنحو صحيح على المادة العادية. المادة العادية مؤثرة- بقدر مُبالغ فيه- إذا أخذنا بعين الاعتبار ضآلة وفرتها بسبب انهيارها إلى قرص كثيف من المادة حيث يمكن أن تتشكل النجوم والكواكب والأرض وحتى الحياة. وقد ينهار أيضاً مُكوِّن من مكونات المادة المعتمة المشحونة – وإن لم يكن بوفرة بالضرورة – ليشكل أقراصاً مثل القرص المرئي في درب التبانة. كما قد يتجزأ إلى أجرام شبيهة بالنجوم. ومن حيث المبدأ، قد نتمكن من رصد مثل هذه البنية الجديدة الشبيهة بالقرص، والتي قد تكون متاحة أكثر من المُكوِّن التقليدي للمادة المعتمة الباردة السائد والمنتشر بكثافة أقل على شكل هالة كُروية هائلة.

لا تكاد تبدأ التفكير بهذه الطريقة، حتى تتضاعف الاحتمالات بسرعة. في النهاية الكهرومغناطيسية هي واحدة فقط من عديد من القوى غير الجذبية Non-gravitational forces التي تتفاعل بها جسيمات النموذج المعياري. إضافةً إلى القوة التي تربط الإلكترونات بالأنوية، تتفاعل جسيمات النموذج المعياري في عالمنا من خلال قوى نووية ضعيفة وقوية. ولا يزال هناك مزيد من القوى التي يمكن أن تكون موجودة في عالم المادة العادية، ولكن يجب أن تكون ضعيفة جداً من حيث الطاقة المتاحة، ولذا لم يرصد أحدٌ ما أي إشارة منها حتى الآن. ولكن حتى وجود ثلاث قوى غير جذبية يقترح أن القطاع المعتم المتفاعل قد يتأثر هو أيضاً بقوى غير جذبية أخرى غير الكهرومغناطيسية المعتمة فحسب.

وربما تعمل القوى النووية على جسيمات المادة المعتمة إضافةً إلى القوة الكهرومغناطيسية. في هذا السيناريو الأكثر غِنًى يمكن أن تتشكل نجوم معتمة تمر عبر عملية احتراق نووي لتولِّد بُنى تتصرف بشكل أكثر شبها بالمادة العادية أكثر منه بالمادة المعتمة التي وصفتُها حتى الآن. في تلك الحالة، يمكن أن يمتلئ القرص المعتم بنجوم معتمة محاطة بكواكب معتمة تتكون من ذرات معتمة. ويمكن أن تمتاز المادة المعتمة ثنائية القرص عندها بكل تعقيدات المادة العادية.

من المؤكد أن المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً تهيئ أرضاً خصبة للتنبؤات، وتشجعنا على التفكير في احتمالات ما كنا لنفكر فيها من قبل. وسيجد الكتّاب ومرتادو السينما أن سيناريو بمثل هذه القوى والنتائج الإضافية في القطاع المعتم هو أمرٌ مُغرٍ. وربما سيقترحون حتى حياة معتمة تتعايش مع حياتنا. في هذا السيناريو بدلاً من أن تكون المخلوقات المتحركة العادية تقاتل مخلوقات متحركة أخرى أو في حالات نادرة تتعاون معها، ستزحف جيوش من مخلوقات المادة المعتمة عبر الشاشة، وتحتكر كل التشويق.

ولكن هذا لن يكون مثيراً للمشاهدة. المشكلة هي أن المصورين السينمائيين سيجدون صعوبة في تصوير الحياة المعتمة، التي هي بالطبع غير مرئية بالنسبة إلينا – وإليهم. حتى إن كانت المخلوقات المعتمة موجودة (وربما كانت كذلك) فإننا لن نعرف أبداً. ليس لديك أي فكرة عن كم ستكون الحياة المعتمة لطيفة – ومن شبه المؤكد أنك لن تعرف ذلك أبداً.

على الرغم من أنه من المُمتع أن نتسلى بتخمين احتمال وجود حياة معتمة، فإن من الصعب جداً أن نجد طريقة لرصدها – أو حتى استشعار وجودها بطرق غير مباشرة. بل حتى العثور على حياة مصنوعة من مادتنا هو تحدٍّ عسير، على الرغم من استمرار عمليات بحث جاهدة في السعي إلى العثور على الكواكب الواقعة خارج المجموعة الشمسية. ولكن الدليل على حياة معتمة، إذا ما وُجدت، سيكون أكثر مراوغة من الدليل على وجود حياة عادية في عوالم بعيدة.

لا يزال يتعين علينا بعد أن نرصد مباشرة موجات الجاذبية يبُثُّها جرم واحد فقط. حتى الثقوب السوداء والنجوم النيوترونية، التي رصدها علماء الفلك بطرق أخرى، لا تزال مستعصية حتى الآن على طرق رصد موجات الجاذبية. أمامنا فرصة ضئيلة، أو معدومة، لرصد تأثير جاذبية كائن معتم، أو حتى أي جيش من الكائنات المعتمة – مهما كانت قريبة منا.

في الوضع المثالي سنود بطريقة ما أن نتواصل مع هذا القطاع الجديد – أو نجعله يتراسل معنا بطريقة ما. ولكن إذا لم تكن هذه الحياة الجديدة تتأثر بالقوى نفسها التي نتأثر بها، فإن ذلك لن يحدث أبداً. حتى إن كنا نتشارك في الجاذبية، فمن شبه المؤكد أن القوة التي يفرضها جرم صغير أو شكل من أشكال الحياة ستكون أضعف من أن نتمكن من التقاطها. الأجرام الضخمة المعتمة فقط، كقرص يمتد عبر مستوى درب التبانة، قد تكون له نتائج مرئية – مثل التي سنناقشها لاحقاً.

قد تكون العناصر المعتمة أو الحياة المعتمة قريبة منا جداً – ولكن ما لم يكن صافي كتلة الأشياء المعتمة كبيراً جداً، فلن تكون لدينا طريقة لمعرفة ذلك. حتى مع التقنيات الحديثة الحالية، أو أي تقنيات يمكننا أن نتخيلها حالياً، بعض الاحتمالات الخاصة جداً فقط هي التي يمكنها أن تكون قابلة للاختبار. فـ"حياة الظل" Shadow life، بقدر ما ستكون مثيرة، لن يكون لها أي نتائج مرئية يمكننا أن نرصدها، مما يجعله احتمالاً مثيراً، ولكنه مُحصن ضد الملاحظة.

من باب الإنصاف، الحياة المعتمة أمرٌ يصعب التحقق منه. قد لا يصعب على كُتاب الخيال العلمي اختلاقها، ولكن أمام الكون Universe عقبات كثيرة ليتجاوزها. من بين كل احتمالات الكيمياء الممكنة، من غير الواضح أي عدد منها يمكنه أن يدعم قيام حياة، وحتى من بين هذه التي يمكنها ذلك، نحن لا نعرف نوع البيئة التي ستكون ضرورية للحياة. بقدر ما هي مغرية، الحياة المعتمة ليست صعبة الاختبار فحسب. بل من الصعب على الكون توليدها أيضاً. لذلك سأترك هذا الاحتمال جانباً – على الأقل حاليا – وسأركز على الأهداف والأبحاث عن قرص كثيف ضخم – والذي أعتقده أنها واعدة.

علامات تدل على قرص معتم

فلنكن منهجيين ولنبدأْ بأصغر الاحتمالات. درسنا أنا وجيجي فان وآندريه كاتز ومات ريس أبسط نموذج من نماذج الجسيمات DDDM يمكننا أن نفكر فيه. إلى جانب المادة المعتمة ضعيفة التفاعل، احتوى نموذجُنا على جسيمات معتمة مشحونة وعلى قوة معتمة تشبه الكهرومغناطيسية، التي تتفاعل من خلالها جسيمات المادة المعتمة المشحونة. احتوى النموذج على جسيم ثقيل موجب الشحنة كالبروتون وعلى جسيم سالب الشحنة يشبه الإلكترون.

إن العمل على فكرة جديدة لم تدخل بعد في التيار الفيزيائي السائد دائماً ما يكون معركة صعبة. إذ يعتقد بعض علماء الفيزياء والفلك أن المادة المعتمة ثنائية القرص أمر مبالغ فيه. وبين علماء الفيزياء- وعلى الرغم من الطبيعة الجريئة لأبحاثهم التي تسعى إلى الكشف عن العناصر الأساسية للمادة- فإن عديداً من زملائي – والعلماء عموماً – يقفون في الجهة المحافظة. هذا ليس بالأمر غير المبرر: إذا كان هناك تفسير تقليدي لملاحظة ما، فغالباً ما يكون هذا هو التفسير الصحيح. ولا ينبغي قبول الأفكار المتطرفة إلا عندما تشرح ظواهر فشلت الأفكار القديمة في شرحها. في حالات نادرة جداً تكون الأفكار الجديدة ضرورية حقاً لتفسير الملاحظات الرصدية.

حتى عندما يوافق المجتمع العلمي على أن هناك حاجة إلى شيء جديد، فإن الحيود عن بعض الاقتراحات "المقبولة" المدروسة دراسةً مكثفة قد يواجه قدراً من المقاومة. إذ ينظر علماء فيزياء الجسيمات عادة إلى التناظر الفائق Supersymmetry والجسيمات WIMP، على سبيل المثال، على أنها مبرهن عليها تقريباً، على الرغم من أن الدليل التجريبي لم يُثبت ذلك بعد. فقط في مواجهة تزايد البيانات المقيدة يبدأ عديد من أعضاء المجتمع العلمي التسليم بالشك ويبدؤون البحث عن احتمالات جديدة لما يكمن وراء التيار البحثي الراسخ.

لكن بمجرد أن يترسخ مفهوم جديد، حتى يعمل عليه الجميع بلا كلل، فيستكشفوا كل زاوية من زواياه ويختبروها – حتى لفرضيات لم تُبرهَن صحتُها بعد. ولكن قبل أن تصل أي فكرة إلى هذه المرحلة، يسود كثير من النقد (المبرر غالباً). ويحاول قلة من علماء فيزياء الجسيمات – من بينهم أنا وزملائي – ببساطةٍ الحفاظَ على ذهن منفتح في مواجهة عدم اليقين. قد نفضل بعض النظريات التي نجدها أنيقة أو اقتصادية، ولكننا لا نقرر ما هو صحيح – أو ما يجب العمل عليه – إلى أن يفتح تحكيم البيانات أبواباً أو يغلقها.

سرعان ما أدركنا أنا وزملائي أنه يجب أن تكون للمادة المعتمة المتفاعلة- التي تتصرف بنحو مختلف عن المادة المعتمة غير المتفاعلة- نتائجُ مميزة قابلة للرصد. ولكن نظراً إلى الدافع الأولي وراء اقتراح نموذج الجسيمات DDDM، فسأستعرض باختصار ما تعنيه نتائجه ضمنياً بخصوص طرق بحث أكثر تقليدية، مثل الاستكشاف غير المباشر للإشارة التي حفّزت بحثنا بالدرجة الأولى – إضافةً إلى موضع قد يحل فيه نموذج الجسيمات DDDM المشكلة التي تواجه سيناريوهات المادة المعتمة التقليدية. سأبدأ باستعراض العلامات غير المباشرة، مثل إشارة فوتون فيرمي التي قادتنا إلى إجراء بحثنا.

إن قرصاً معتماً نحيفاً هو كثيفٌ، بمعنى: أن تركيز جسيمات المادة المعتمة عالٍ. داخل مثل هذا القرص الكثيف، هناك مزيد من المادة المعتمة ومن ثم يجب أن يُفنى مزيد من المادة المعتمة المتوزعة في هالة المادة المعتمة الباردة التقليدية. هذا لا يعني أن كل نماذج الجسيمات DDDM ستكون قابلة للرصد بهذه الطريقة. لكي تولد الجسيمات DDDM إشارة فوتون غير مباشرة، وهي التي كانت المحفِّز الأولي لتطوير فكرتنا، ستكون هناك حاجة إلى عنصر إضافي إلى جانب المادة المعتمة المشحونة التي وصفتها حالاً. لأن الإشارة الشبيهة بإشارة فيرمي تتطلب تحويل المادة المعتمة إلى فوتونات- وهي شكل من أشكال المادة العادية- سينشأ تفاعل قابل للرصد فقط إذا كان هناك جسيمٌ مشحون يتفاعل بالقوة الكهرومغناطيسية العادية والمعتمة – هذا يشبه شخصاً يشاهد فوكس نيوز ويستمع إلى إذاعة NPR، أو سجَّل الدخول في كل من فيسبوك وغوغل بلس. إذا كان هناك جسيم مشحون يتفاعل بكلا نوعي الكهرومغناطيسية، يمكن عندها أن تفنى المادة المعتمة إلى فوتونات من خلال إنتاج هذا الجسيم الوسيط ذي الصلة بكلا القطاعَين المعتم والمرئي. وهذا يجعل إشارة فيرمي تنبؤاً محتملاً- ولكنه ليس تنبؤاً عاماً- للبرهنة على نموذج الجسيمات DDDM.

لكن القرص الكثيف يعني أنه في حال وجود تفاعلات قابلة للرصد، فإنها ستحدث بمعدل أسرع من المتوقع. ولعل الأفضل من ذلك هو إذا ولّدت الجسيمات DDDM أي إشارة كشف غير مباشرة Indirect detection signal، سواء كانت فوتونات أو بوزيترونات أو ضديدات بروتونات، فستكون النتيجة مُغايرة لنتائج أي نوع آخر من نماذج المادة المعتمة. وبإشارة كشف غير مباشر للمادة المعتمة من النوع الاعتيادي من المادة

المعتمة، يكون المعدل المتوقع أعلى ما يكون بالقرب من مركز المجرة، حيث تكون كثافة المادة المعتمة في أعلى قيمة لها. كما ستكون الإشارة من الجسيمات DDDM أقوى نحو المركز المجرِّي، ولكن أي إشارة تأتي من المركز المجري يجب أن تكون موجودة في معظم أنحاء المستوى بكامله أيضاً – لأن المادة المعتمة كثيفة في معظم أنحاء هذه المنطقة. سيكون هذا الإفناء المشاهَد في المستوى المجري هو الدليلَ الدامغ على صحة نموذج الجسيمات DDDM.

من المثير للاهتمام أيضاً النتائج المحتملة للنموذج DDDM في تجارب الكشف المباشر، التي هي، في النهاية، "الكأس المقدسة" لكثير من الباحثين عن المادة المعتمة. تذكَّرْ أن الكشف غير المباشر يعتمد على تفاعل صغير بين المادة المعتمة والمادة العادية، مما يسمح بإيداع طاقة ارتداد Recoil energy ضئيلة يمكن أن يرصدها الكاشف. كما هي الحال في الكشف غير المباشر، ستعتمد أي إشارة كشف مباشرة في نماذج الجسيمات DDDM على الافتراض المتفائل (غير العام) بأن للمادة المعتمة بعض التفاعلات مع المادة العادية – وهي ضعيفة بما يكفي لتكون متوافقة مع كل شيء نعرفه، ولكن قوية بما يكفي لتؤدي إلى نشوء إشارة قابلة للرصد.

تعتمد إشارة الكشف المباشر أيضاً على كثافة المادة المعتمة المحلية، لأنه كلما زادت المادة المعتمة كان ذلك أفضل. قد يوجد قرص المادة المعتمة- أو لا يوجد- في محيط المادة العادية – هذا يعتمد على سُمك مستوى القرص المعتم – ولكن إن كان الأمر كذلك، فيجب أن تكون له كثافة أكبر بكثير من المادة المعتمة في الهالة.

من المعروف أن معدل اكتشاف المادة المعتمة يعتمد على كتلة جسيم المادة المعتمة، الذي يساعد على تحديد ما إذا كانت طاقة الارتداد كبيرة بما يكفي لرصدها، وإذا كانت كذلك، كمية الطاقة التي ستُسجَّل. إن قابلية اكتشاف إشارة لها اعتماد مماثل على خاصية مغفلة من خواص المادة المعتمة، ألا وهي سرعتها، وهي ضرورية أيضاً للطاقة الحركية ومن ثم لكمية طاقة الارتداد. من الأسهل اكتشاف المادة المعتمة الأسرع مقارنة بالمادة المعتمة الأبطأ، لأن الطاقة المتولدة ستكون أكبر.

ستكون سرعة الجسيمات DDDM أبطأ بكثير داخل وخارج المستوى المجرِّي مقارنةً بالمادة المعتمة العادية، ذلك لأنها بردت. فضلاً عن ذلك تدور المادة المعتمة حول المجرة مثل المجموعة الشمسية، لذا فإن سرعتها بالنسبة إلينا صغيرة جداً أيضاً. والسرعة البطيئة لمكون المادة المعتمة الجديد المرتبط بنا يعني أن الجسيمات DDDM ستنقل طاقة ضئيلة في أي تجربة كشف مباشر – حتى لو تفاعلت الجسيمات – من شبه المؤكد أن مستوياتها ستكون أدنى من عتبة اكتشاف الطاقة ومن ثم لن نتمكن من رصدها. من دون أجهزة كشف أكثر حساسية أو بعض المكونات الإضافية الأخرى في النموذج، لن تُسجَّل تفاعلات الجسيمات DDDM التقليدية باستخدام أجهزة الكشف المباشر العادية.

لكن، لا يزال يجري العمل على تجارب ذات عتبات منخفضة وتنويعات Variants من النموذج قد تسمح بالتقاط إشارة. المثير هنا أيضاً هو في حال رؤية إشارة، ستكون متميزة بما يكفي لتحديد أصل الجسيمات DDDM. وقد تؤدي السرعة المنخفضة للمادة المعتمة إلى توليد إشارة كانت مركَّزة في شكل طاقة أكثر بكثير من أي مادة معتمة سبق اقتراحها فيما مضى.

اختبار مثير للاهتمام آخر لنموذجنا – أو أي نموذج مادة معتمة يحتوي على مادة معتمة مشحونة تتحد فيما بينها في ذرات – يأتي من الدراسة المعمقة لإشعاع الخلفية الميكروية Microwave background radiation. استخدم عديد من علماء الفلك والفيزياء بيانات إشعاع الخلفية الكونية الميكروية وتوزيع المجرات للبحث عن أدلة على ذرات معتمة والجسيمات DDDM بطريقة جديدة مثيرة.

تذكر أن الإشعاع في المادة العادية قد يقضي على اختلافات الكثافة في المادة المشحونة- مثل الرياح على الشاطئ تمحو الدليل على المد والجزر – في حين يتزايد ببساطةٍ نمو المادة المعتمة من حيث البنية. يمكن استخدام هذه التأثيرات المميزة التي تطبع نفسها على إشعاع الخلفية الكونية الميكروية للتمييز بين المادة المعتمة والمادة العادية. يمكن أن تترك المادة العادية أيضاً أثراً Imprint عندما تندمج المادة المشحونة في مادة

محايدة Neutral matter، مثل الارتفاع الواضح في تراكم الرمال عند الحد الأقصى الذي يصل إليه الماء وهو يزحف على الشاطئ.

إذا كانت المادة المعتمة – أو على الأقل جزء منها – يتفاعل أيضاً مع الإشعاع المعتم، فستطبع تأثيرات مشابهة لتأثيرات المادة العادية نفسها في إشعاع الخلفية الكونية الميكروية. ولأن نموذجنا يحتوي على كل من جسيم مادة معتمة ثقيل، وعلى جسيم خفيف بشحنة معاكسة – أي يشبه إلى حد بعيدٍ البروتون والإلكترون – ستتحد هذه الجسيمات في ذرات معتمة يمكن رصدها بطرق مشابهة جداً للمادة العادية.

أظهرت الدراسة التفصيلية لإشعاع الخلفية الكونية الميكروية أن جزء المادة المعتمة الذي يمكن أن تكون له تفاعلات من النوع الذي اقترحناه هو جزء مقيد. إذا كانت درجتا حرارة هذين القطاعين متشابهتين جداً، كما ستكون الحالة إذا تفاعلت المادة المعتمة والمادة العادية بقدر كافٍ في وقت مبكر، فقد تكون كمية المادة المعتمة المتفاعلة منخفضة بنسبة 5% من إجمالي كمية المادة المعتمة – نحو ربع كمية المادة المرئية. لحسن الحظ لا تزال هذه القيمة مثيرة للاهتمام، ويجب أن تكون قابلة للرصد باستخدام الطريقة الموضَّحة أدناه. كما أنها تقع ضمن نطاق القيمة المطلوبة لتفسير الضربات النيزكية الدورية التي سأتطرق إليها في الفصل التالي.

قياس شكل المجرة

البحث الذي وصفتُه من فوري مثير للاهتمام لأنه لا يبيِّن قوة إشعاع الخلفية الكونية الميكروي فحسب، بل يبين أيضاً أهمية مجموعات البيانات الكبيرة التي صارت متوافرة في الحقبة الكونية الحديثة – وعلماء الفلك مهيَّؤون لمعالجتها. مع مدخلات Input منظور بناء النماذج والتقدمات الرقمية والتقنية الحالية، لدينا فرصة أكبر للعثور على تأثيرات المادة المعتمة غير التقليدية – حتى عندما تكون تأثيراتها في التوزع الملحوظ للبنية تأثيراتٍ ضئيلة. لاحظت أنا وزملائي أن عديداً من الإشارات الأكثر تشويقاً للاهتمام وقوة هي على الأرجح ليست تلك التي تستهدفها أبحاث المادة المعتمة العادية التي تطرقت إليها فيما مضى. إذ تنجم معظم نتائج المشاهدات الرصدية الواعدة لقرص المادة المعتمة من قوة جاذبية القرص نفسه. حالياً في عصر "البيانات الكبيرة" Big data، قد يكون أفضل مكان للبحث عن خواص المادة المعتمة المميزة هو مجموعة البيانات الفلكية التي تبدو عادية في ظاهرها.

الإشارة الضمنية الأكثر وضوحاً وحسماً لاقتراح نموذج الجسيمات DDDM هو وجود قرص معتم نحيف في مركز مستوى المجرة. إذا كانت جسيمات المادة المعتمة أثقل من البروتون، فسيكون القرص أضيق مساحة من ذلك الذي يحتوي على النجوم والغاز، ما يجعل طاقة وضع الجاذبية Gravitational potential التي تبذلها مجرة درب التبانة – وغيرها – مختلة عما هو متوقع من دون شكل جديد من المادة المعتمة. مثلَ الإعلان الموجه سيضيف القرص المعتم ثقلاً إضافياً إلى عنصر المادة المعتمة الأكثر انتشاراً – إضافة إلى تغيير توزُّع المادة – مما يؤثر في طاقة وضع الجاذبية بنحو أكثر حدة بالقرب من المستوى الأوسط للمجرة، حيث يتركز قرص المادة المعتمة. ونظراً إلى أن تأثير الجاذبية لتوزُّع المادة هذا سيؤثر في حركة النجوم، وعند قياس مواقع وسرعات النجوم بدقة كافية، فسيؤكد التوزيع- أو يستبعد- وجود القرص المعتم (أو على الأقل قرص ذي كثافة كبيرة بما يكفي لإحداث فرق).

في صيف العام 2013، كان واحدٌ من أروع التطورات المذهلة التي سمعنا بها أنا وجيجي وآندريه ومات، عندما بدأنا التفكير في قرص المادة المعتمة، هو أنه من المقرر إجراء هذا القياس تحديداً على مجرة درب التبانة. فالقمر الاصطناعي- الذي كان من المُزمع إطلاقه في ذلك الخريف (أو في الربيع بالنسبة إلى من هم في

موقع إطلاق مركز غويانا الفرنسية كما أشار زميلي الأسترالي المرتبك)- من المفترض أن يقيس تأثير الجاذبية المميز هذا.

سيقيس القمر الاصطناعي غايا GAIA في الواقع شكل المجرة. وفي غضون خمس سنوات سنعرف النتائج. كانت الاستعدادات لإطلاق القمر جارية بالفعل عند عملنا على ورقتنا البحثية الأولى، ولكنه كان سينفذ تحديداً قياس القرص المعتم الذي ربما كنا سنطلبه لو أننا سُئلنا في أثناء التحضيرات للقمر الاصطناعي. في الواقع على الرغم من أنهم لم يكونوا يأخذون بعين الاعتبار نموذجنا وطريقتنا المحددة فإن علماء الفلك في بعثة GAIA ناقشوا بنحو مستفيض مهمة القمر الاصطناعي استناداً إلى قدرته على تحديد توزُّع الكتلة في المجرة – بغض النظر عن نوع أو مكان المادة في المجرة. على الرغم من تأخر الإقلاع عدة أشهر من تاريخ الإقلاع المحدد في البداية، كان إقلاعه في ديسمبر من تلك السنة – فقط بعد عدة أشهر من استكمال دراستنا – مصادفة مذهلة.

لا يواجه علماء فيزياء الجسيمات هذا النوع من المفاجآت كثيراً. نحن نعلم أي التجارب ممكنة، ونحاول معرفة إن كان من الممكن تطويعها أو تفسيرها بطريقة تختبر أفكاراً جديدة. تدرس التجارب في مصادم الهدرونات الكبير (LHC) في سيرن بعض الاقتراحات التي ابتكرناها أنا ورامان ساندروم Raman Sundrum وآخرون لتفسير كتلة بوزون هيغز، على سبيل المثال. على الرغم من أن التجربة LHC صُممت في البداية مع وضع نماذج أخرى في الاعتبار، كنتُ أنا ورامان على دراية تامة بها وبإمكانياتها عند إجرائنا لبحثنا على بُعد إضافي مشوَّه Warped للفضاء.

من ناحية أخرى أحياناً تكون فكرة ما مقنعةً وقابلة للاختبار بما يكفي بحيث سيستجيب العلماء التجريبيون ويصمِّمون تجربة على نطاق صغير نسبياً لدحض الاقتراح أو التحقق منه، مثلما صمم علماء الفيزياء التجارب لقياس قوة الجاذبية بنحو أدق استجابة لأفكار البعد الإضافي الكبير Large extra-dimension.

ولكن نادراً ما يصادف أن تنطلق تجربة على الفور وتكون مهيأة لاختبار فكرة قيد الدراسة بنحو مستقل ولأهداف مختلفة تماماً. مع ذلك هذا ما حدث. يستضيف القمر الاصطناعي غايا GAIA مرصداً فضائياً يقيس مواقع وسرعات بليون نجم في درب التبانة، بهدف إجراء مسح مجرّي ثلاثي الأبعاد بنحو دقيق وواسع النطاق. سترسم قياساته مخططاً لطاقات الوضع المجرية، وبذلك سيخبرنا عن توزيع كثافة المجرة. إذا أظهر هذا التوزُّع وجود قرص معتم، سيدلنا سُمك القرص وكثافته عن كتلة النوع الجديد من جسيم المادة المعتمة ومقدار المادة المعتمة المتفاعلة.

يعتمد هذا المنهج على فكرة اقترحها يان أوورت Jan Oort – عالم الفلك الذي أثبت وجود سحابة أوورت. أدرك أوورت أن سرعات النجوم في أثناء دخولها وخروجها من المستوى المجري تعتمد على شكل القرص وتوزيع كثافته، نظراً إلى أن حركتها تتأثر بقوة جاذبية القرص. لذلك فإن قياس سرعات النجوم المتذبذبة ومواقعها من وإلى المستوى المجري سيؤدي إلى تحديد كثافة المادة المعتمة في القرص وتوزيعها المكاني.

هذا هو تحديداً ما نود معرفته لاختبار أو تأكيد اقتراحنا عن القرص المعتم. تؤثر قوة جاذبية القرص المعتم في حركة النجوم، لأنها تتأثر بجاذبية المجرة. لذلك فإن معرفة مواقع وسرعات كثير من النجوم بنحو دقيق ستكشف عن مقدار طاقة وضع جاذبية المجرة، وتحدِّد وجود القرص المعتم أو عدم وجوده. وبتحليل المعلومات التفصيلية لطاقة وضع القرص والتوزُّع المكاني للمادة فيه، نأمل أن نتمكن من تحديد مزيد من خواص القرص والمادة المعتمة المتفاعلة التي صنعته.

ولكننا لسنا في حاجة إلى أن ننتظر بيانات غايا لاختبار الطريقة والحصول على نتائج أولية. فلدينا بالفعل بيانات مفيدة من القمر الاصطناعي هيباركوس Hipparcos، الذي أطلقته وكالة الفضاء الأوروبية (اختصارا: الوكالة إيسا ESA) في العام 1989، والذي استمر في العمل حتى العام 1993. كان هيباركوس هو الأولَ في قياس الموقع والسرعة بالتفصيل، ولكنه حقق ذلك بدقة أقل وبعدد أقل من النجوم مما سيحققه غايا

في مسحه. مع ذلك فإن نتائجه، وإن لم تكن كاملة مثلما ستكون نتائج غايا، تقيد الشكل الذي قد يتخذه القرص المعتم.

كانت هذه الرؤية معروفة بين بعض علماء الفيزياء الفلكية، على الرغم من أنها كانت جديدة علينا نحن علماء فيزياء الجسيمات. في الواقع، باستخدام هذا المنهج، ذهب عدد قليل من الباحثين إلى حد استنتاج أن البيانات الموجودة تستبعد وجود قرص معتم. وأربك هذا الإنكار المتعجرف للقرص كثيرينن، ومن بينهم أحد محكِّمي دراستنا. ولكن لحظة تأمل ستخبرك بأن هذه النتيجة (على الأقل كما طُرحت) ليست ممكنة. بغض النظر عن مدى دقة القياس، يمكن أن تكون الكثافة منخفضة دائماً بما يكفي لتفلت من أي حدٍّ موجود. ما كان علماء الفلك يقولونه حقاً أنه ليست هناك حاجة إلى القرص المعتم. بالنظر في حالات عدم اليقين في كثافات الغازات ومكونات النجوم المعروفة، يمكن أن تبرر المادةُ المعروفة وحدها طاقةَ الوضع المَقيسة.

ولكن أحياناً يكون السؤال الصحيح هو ما الذي يتوافق مع هذا أيضاً، ومن ثم يكون تفسيراً بديلاً موثوقاً به للبيانات. الطريقة الوحيدة لمعرفة ما إذا كان شيءٌ ما مسموحاً به أو حتى مفضلاً هو تقييم نتائج الافتراضات الجديدة، وتحديد تضميناتها التجريبية. سألتُ أنا وزملائي سؤالاً مختلفاً عن بقية علماء الفلك. نحن لم نطلب دليلاً على وجود قرص معتم. السؤال الحقيقي هو ما درجة ضرورة وجود قرص ليحافظ على التوافق مع كل الملاحظات الرصدية. وما إذا كان إدخال مكوِّن من مكونات القرص المعتم سيساعد على التطابق مع البيانات تطابقاً أفضل.

تعكس هذه الطريقة المختلفة في التفكير- إلى حد كبير- الفرقَ بين سوسيولوجيا علماء فيزياء الجسيمات – وخاصة مصممي النماذج – وعديد من علماء الفيزياء الفلكية. ولكن من باب نسب الفضل، علَّمنا علماءُ الفيزياء الفلكية كثيراً. تعلمنا كيف يتناولون المشكلة وما البيانات الحالية الموجودة. فكان نهجهم مفيداً جداً. ولكن تناول المشكلة من زاوية مختلفة غالباً ما يؤدي إلى رؤى جديدة، ويفتح المجال لاحتمالات جديدة. سواء وُجد قرص معتم أو لا، سنعرف فقط من خلال الافتراض أنه موجود واكتشاف ما هو موجود. والكل يفوز في النهاية.

أردنا أن نعرف ما إذا كان احتمال القرص المعتم مسموحاً به، أو حتى ربما مفضَّلاً، وفقاً للبيانات – ليس فقط ما إذا كان يمكن للمرء أن يُلائم خصائص النجوم المَقيسة أو لا من دون قرص. كل مكوِّن من مكونات المادة العادية -مُضافٍ إلى حساب طاقة وضع جاذبية قرص درب التبانة- معروفٌ معرفةً جيدة. ومن المؤكد أن الأخذ بأوجه عدم اليقين في القياسات بعين الاعتبار يفسح المجال أمام نشوء شيء جديد. وهذه هي المهمة التي أعطيتُها لطالب من طلبتي، إريك كريمر Eric Kramer، الذي درس بيانات هيباركو إضافةً إلى قياسات كثافة الغاز في المستوى المجري. وحددنا معاً عديداً من الافتراضات المفترضة في تحليل علماء الفيزياء الفلكية والتي كانت في حاجة إلى إعادة النظر فيها. على الرغم من أن فحصاً سريعاً لنتائج هيباركو يمكن أن يؤدي إلى استنتاج متسرع يفيد بأن القرص المعتم غير محبَّذ، غيرَ أن تحليلاً دقيقاً ومعاصراً للتحديثات يُبيِّن أن البيانات لم تكن كافية للتوصل إلى مثل هذا الادعاء.

تعرض بيانات هيباركو بحد ذاتها بعضاً من عدم اليقين. ولكن القياسات الركيكة نسبياً لبعض المادة المرئية في درب التبانة هي مصدر رئيس لعدم اليقين أيضاً. كلما زاد هامش المناورة، كانت هناك فرصة للقرص المعتم. إضافةً إلى ذلك، نظراً إلى أن كل عناصر المادة تتأثر بالجاذبية الملقاة عليها من المكونات الأخرى، من البداية يمكن للمرء أن يستنبط القيود الحقيقية فقط بتضمين كل المادة – بما فيها القرص المعتم. هذه إحدى مزايا وجود نموذج. فهو يعطي هدفاً محدداً تحديداً جيداً واستراتيجية حسابية ثابتة عند تقييم نتائج البحث.

بالتحليل الدقيق وجدنا أن هناك فرصة للقرص المعتم. فالمؤشرات واعدة، ولكن قبل أن يتوافر مزيد من البيانات الحاسمة لا نعلم ما إذا كان نموذج الجسيمات DDDM سيثبت صحته أو أن سيناريوهات أبسط وأكثر معيارية ستكون كافية لتفسير المادة في كوننا.

يقودني هذا إلى السؤال: ما كثافة القرص المعتم التي كنا نأمل استهدافَها في المقام الأول؟ أي ما مدى قوة القيد Constraint ليكون مثيراً للاهتمام؟ من عدة زوايا فإن أي قيمة تستحق الاستمرار في البحث. فالعثور على قرص معتم، مهما كانت كثافته ضئيلة، سيؤدي إلى تغير جوهري في نظرتنا إلى الكون. ولكننا سنرى قريباً أن هدفاً آخر ينبع من خاصية تحفيز المادة المعتمة للضربات النيزكية الدورية. في الوقت الحالي، سأقول ببساطةٍ إن القيمة التي وجدناها ضرورية لتحفيز ضربات نيزكية إنما تتوافق مع البيانات الحالية.

إضافةً إلى ذلك على الرغم من أنه لم يكن هدفنا الأصلي، إلا أن المادة المعتمة المتفاعلة جزئياً قد تساعد على حل بعض ألغاز سيناريوهات المادة المعتمة الباردة التقليدية. اقترح عالم الفلك ماثيو وولكر Matthew Walker، الأستاذ في جامعة كارنيغي ميلون حالياً، أن نموذج الجسيمات DDDM قد يساعد على معالجة مشكلة المجرات القزمة التابعة للمرأة المسلسلة التي أشيرَ إليها في الفصل الثامن عشر. إذ إن عالَماً من المادة العادية أو المادة المعتمة الباردة التقليدية لا يقدم تفسيراً تدعمه هذه النتائج. بيَّنا أنا وباحث ما بعد الدكتوراه في هارفارد، جايكوب شولتز Jakub Scholtz، أن التفاعلات الذاتية في مكوِّن من مكونات المادة المعتمة قد تقدم حلاً فريداً لمشكلة كيفية تشكُّل المجرات القزمة التي تهيمن عليها المادة المعتمة المتراصفة في مستوى. كما أنني وجايكوب وماثيو ريس ننظر في التبعات المحتملة لنموذج الجسيمات DDDM في الثقوب السوداء البدئية Primordial black holes، التي هي أكبر مما ينبغي أن تكون عليه في السيناريوهات النموذجية.

الآن يبدو أن إشارة أشعة غاما التي التقطها التلسكوب فيرمي -والتي أطلقت مشروعنا- كانت إشارة زائفة، لأن الإشارة تلاشت مع الزمن. ولكن سيناريو القرص المعتم الذي نشأ من محاولة فهم هذه الإشارة له تضمينات واسعة النطاق ستجعل الجسيمات DDDM قابلة للرصد بطرق أخرى. قد يكون للسيناريو تداعيات مثيرة للاهتمام حول تشكُّل المجرات والديناميكيات التي يمكننا الآن أن نبدأ في استكشافها.

الآن، وبعد استكشافنا الموسع للكون والمجموعة الشمسية، دعونا نُنهِ رحلتنا بتجميع كثير من هذه الأفكار في سلسلة متسقة. سندرس الآن تأثير المادة المعتمة فينا وقريباً من موطننا – فهي تؤثر في حركة النجوم، ومن المحتمل في استقرار الأجرام في أطراف المجموعة الشمسية.

مصطلح "Boffins" (الفطاحل) ليس مألوفاً لعديد من الأمريكيين. لذلك عندما أَطلق عليَّ أنا وزميلي ماثيو ريس الكاتبُ في العلوم والتكنولوجيا سايمون شاروود Simon Sharwood هذه الصفة في المجلة البريطانية ريجستر Register، لم أكن متأكدة في البداية ماذا كان شعوري. هل كان الكاتب ينتقدنا نحن وطُرقَنا السخيفة، أو هل كانت كلمة "Boffins" كلمة مثل "Pulchritude" (الجمال والرقة) التي قد يظنها السامع كلمة سيئة – ولكنها في الحقيقة كلمة مديح؟

شعرتُ بالارتياح عندما عرفت أن "Boffins" تعني العالم أو الخبير التقني – وإن كانت بمعنى المبالغين في التركيز. ولكن خوفي الأولي من أن الكلمة كانت تعني "المجانين" أو شيئاً من هذا القبيل لم يكن بلا أساس، نظراً إلى أن الموضوع الذي كان شاروود يتناوله هو المادة المعتمة والنيازك – مع إشارة مختصَرة إلى الانقراض. كانت الفكرة هي أن المادة المعتمة قد ترسل بنحو فعالٍ المذنبات من سحابة أوورت بحيث تُقذَف دورياً إلى الأرض، ومن المحتمل أنها تحفِّز الانقراض الجماعي.

حتى لعلماء فيزياء الجسيمات، مثلي أنا وماثيو ممن يحاولون الحفاظ على ذهن منفتح عند النظر إلى الأمور، بدت الظواهر الفوضوية مثل الاصطدامات النيزكية المربوطة بديناميكيات المجموعة الشمسية بمجملها وبالمادة المعتمة- إضافةً إلى ذلك- طريقاً غيرَ مؤكَّد. في المقابل مادة معتمة (!)، نيازك (!)، ديناصورات (!)، أثارت كل هذه الأشياء فضول الطفل ذي خَمس السنوات القابع فينا، والبالغ فينا أيضاً، ليتعلم مزيداً عن المجموعة الشمسية. طبعاً فضلاً عن العالِم فينا أيضاً، الذي أراد أن يعرف ما إذا كنا نستطيع أن نتعلم مزيداً عن هذه القطع المختلفة، وكيف يمكنها أن ترتبط بعضها مع بعض. ففي المحصلة على الرغم من أنه لا يزال يتعين علينا أن نقيس وجود القرص المعتم، فإنه يمكن لقمر اصطناعي يقيس بليون نجم في المجموعة الشمسية أن تكون لديه الحساسية ليحكم في الموضوع خلال السنوات الخمس المقبلة – واختبار ما إذا كان اقتراحُنا صحيحاً.

في حال كان هذا السيناريو، أو ثراء الأفكار، أو قياسات القمر الاصطناعي المقبلة، ليست برهاناً كافياً لمتابعة هذا الخط من التساؤل، كان اليومُ الذي سألتُ فيه مات عما إذا كان مستعداً للتفكير في هذا المشروع هو اليومَ الذي ضَرب فيه نيزك تشيليابينسك. على الرغم من أن معظم النيازك التي تضرب الأرض أو غلافَها الجوي صغيرة جداً إلى درجة أننا لا نلاحظها، كان النيزك الذي انفجر في 15 فبراير 2013 بعرض 15 إلى 20 م – كبيراً بما يكفي ليتوهج لامعاً ويطلق ما يعادل 500 كيلو طن من المتفجرات TNT. انفجار النيزك بعد ثلاثة أيام من سؤال طرحه عليَّ أحدُ الحاضرين في محاضرة بجامعة آريزونا جعلني أبدأ التفكير في الاصطدامات النيزكية – واليوم الذي اقترحت فيه على مات أن نغوص في عمق الموضوع – كان حدثاً مدهشاً ومثاراً للتندر. كنا نتساءل عما إذا كان علينا أن ندرس سبب وصول العناصر الفضائية إلى الأرض، وفي ذلك اليوم تحديداً وصل شيء من الفضاء. كيف لنا ألَّا نتابع دراسة الموضوع؟

سأشرح الآن بحثنا الذي يربط عديداً من الأفكار التي استطلعها هذا الكتاب، وأشرح كيف يمكن للمادة المعتمة أن تؤثر في الكوكب على مقياس زمني يقارب 30-35 مليون سنة. إذا كنا على صواب، فلمَ يضرب نيزك بعرض 15 كم الأرض قبل نحو 66 مليون سنة فحسب، بل كان المحرض للاصطدام تأثيرُ جاذبيةِ قرص المادة المعتمة في المستوى المتوسط Midplane لمجرة درب التبانة.

السيناريو

لدينا الآن صورة عن مجرة درب التبانة بقرصها المشع من الغاز والنجوم، وفي الداخل ربما قرص آخر أكثر كثافة يتألف من مادة معتمة متفاعلة. نشأت درب التبانة قبل نحو 13 بليون سنة عندما انهارت المادة المعتمة والمادة العادية إلى بنية مرتبطة جاذبياً. ربما بعد بليون سنة من تشكل هالة المجرة Galaxy halo، شعّت Radiated المادة العادية الطاقة لتبدأ في تشكيل القرص المضاء بتوهج الذي نراه حالياً. إذا كان هناك جزء من المادة المعتمة يتفاعل ويرسل فوتونات معتمة بسرعة كافية، فهو أيضاً سينهار إلى منطقة نحيفة مستوية ندعوها القرص. ربما استغرق كل هذا زمناً طويلاً ليكتمل، ولكن القرص المعتم النحيف سيكون قد نشأ قبل زمن طويل.

في هذا الزمن، قبل نحو أربعة بلايين ونصف البليون من السنين، تشكلت الشمس والمجموعة الشمسية. وظهرت الكواكب لاحقاً من قرص المادة التي كانت تحيط بالشمس. بعد تشكُّل الكواكب تحرك المشتري نحو الداخل وتحركت كواكب عملاقة أخرى نحو الخارج، وتبددت بذلك المادة في القرص. تحرك بعضٌ من هذه المادة بعيداً إلى مشارف منطقة سحابة أوورت، حيث ترتبط أجرام جليدية صغيرة بالشمس بفعل شَدٍّ ضعيف جداً من قوة جاذبيتها.

دارت المجموعة الشمسية بعدها حول المجرة كل 240 مليون سنة. ولكن خلال فترة ربما 32 مليون سنة، وفي أثناء دورانها في مسارها الدائري، كانت المجموعة الشمسية أيضا تتذبذب عمودياً على مدارها. وأثرت جاذبية القرص في الشمس إبَّان هذه الرحلة، فكانت القوة التي تعيد المجموعة الشمسية إلى موقعها في كل مرة تفلت قدر استطاعتها إلى أعلى أو أسفل المستوى المتوسط للمجرة. ولأن المجرة لا تشكِّل إلا احتكاكاً ضئيلاً، كررت المجموعة الشمسية حركتها العمودية عبر المستوى المجرِّي دورياً، ليؤثر المستوى بقوة الإرجاع على الشمس في كل مرة تمر فيه المجموعة الشمسية عبره.

إضافةً إلى ذلك في كل مرة كانت المجموعة الشمسية داخل أو بالقرب من المستوى المجري، أثرت فيه تأثيرات المد والجزر والجاذبية المُشوِّهة للقرص. خلال هذه الفترات المتقطعة المرهقة، ربما أثار تأثير المد والجزر لقرص المادة المعتمة الكثيف والنحيف اضطراب بعض الأجرام ضعيفة الارتباط في سحابة أوورت، التي لولا ذلك لبقيت مستقرة في مداراتها البعيدة. وفورَ أن تصبح ضمن نطاق المادة المعتمة، لا يعود من المحتمل أن تبقى الأجرام الجليدية في سحابة أوورت في مكانها في هذه الرحلة المتقلقلة.

في الوقت نفسه، في حين كانت هذه الأجرام الخاوية تباشر رحلتها، بدأت الحياة تتشكل على الأرض قبل نحو ثلاثة بلايين ونصف البليون من السنين، وازدهرت الحياة المعقدة بعد ثلاثة بلايين سنة – أي قبل نحو 540 مليون سنة. مرت الحياة بتقلبات منذئذٍ، وتنافس التنويع Diversification مع الانقراض Extinctions. إذ رقَّمت Punctuated خمس حالات انقراض رئيسة هذه الفترة الزمنية التي تعرف باسم دهر البشائر (الحياة الظاهرة) Phanerozoic era. حدث آخرها قبل 66 مليون سنة، عندما أصابت ضربة نيزكية الأرضَ وألحقت بها الكوارث.

حتى الوقت الذي سبق الاصطدام، كانت الديناصورات غافلة عن أي اضطرابات بعيدة في المجموعة الشمسية. فدارت الأجرام الجليدية ضمن سحابة أوورت، مع تغير طفيف عرضياً لمداراتها بسبب الجاذبية البعيدة لقرص درب التبانة، الذي أثرت بقوى متفاوتة من الشد بحسَب بُعد الشمس عن المستوى المتوسط. واضطربت مدارات عديد من هذه الأجرام الجليدية فقادتها مساراتها إلى المنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية، حيث ابتعد بعض منها عن مساره الأساسي نتيجة تأثير الجاذبية المزعزع. أحد هذه الأجرام الجليدية على الأقل تحول إلى مذنب يدور في مدار سيقوده إلى الاصطدام بالأرض.

من منظور سحابة أوورت، كان اضطراباً ثانوياً. إذ أُزيح واحد أو عدة أجرام جليدية فيه كحد أقصى. بينما من منظور 75% من الحياة على الأرض، بما فيها الديناصورات، كان النيزك الذي صدم الأرض مروِّعاً. مع ذلك حتى لو كانت الديناصورات مخلوقات حذرة وواعية، ما كانت لتلاحظ أي شيء غير عادي على وشك الحدوث عندما ظهر المذنب في البداية. على الرغم من أن نواة المذنب كانت متوهجة بما يكفي لرؤيتها في

النهار، وكان ذيله قابلاً للرؤية في الليل، لم يُظهر المذنبُ أي إشارة ملحوظة عن الكارثة التي كانت على وشك الوقوع. لعل هذا الانطباع قد تغير عندما هبط المذنب، عندما أضاءت النارُ والحُطام السماءَ. ولكن مهما كان ما رأته هذه المخلوقات البائسة أو تصورته، بمجرد أن غيَّر تأثيرُ الجاذبية مسارَ المذنب، تحدد مصير هذه الحيوانات من دون رجعة.

سيصطدم المذنب في يوكاتان، ليسحق هدفه، وينهي رحلة ستنتهي ذروتها بدمار عالمي شامل. عندما ضرب النيزك الذي سيشكل اصطدامُه فوهةَ تشيكشولوب، بخَّر الاصطدامُ المذنبَ والأرضَ المحيطة بالاصطدام – باعثاً أعمدة من الغبار التي انتشرت متبعثرة في أنحاء العالم. أحرقت الحرائق سطح الأرض، وفاضت التسونامي على السواحل بالقرب من الاصطدام وفي الجهة المقابلة من الكوكب، وأمطرت المواد السامة أخطاراً أكبر. هلك المخزون الغذائي، لذلك ربما تضور حتى الموت أيُّ كائن بري نجا في الأعقاب المباشرة للاصطدام في الأسابيع والأشهر التالية. لم تصمد معظم أشكال الحياة عندما واجهتها هذه التغيرات الفجائية والجذرية في مناخ الأرض وسكانها المتنوعين. فقط بقيت الثدييات التي اختبأت تحت الأرض والطيور التي طارت في الأنحاء مختبأة إلى أن تحسنت الظروف لتخلد الحياة المتطورة في مستقبل غير مؤكد لعصر مختلف تماماً.

إنها صورة درامية، غيرَ أن الحقائق الأساسية لاصطدام النيزك أصبحت موثَّقة جيداً. وقد أكدت ملاحظات كثير من الجيولوجيين وعلماء الأحافير أن عنصراً ضخماً ضرب الأرض قبل 66 مليون سنة، وأن 75%، في أقل تقدير، من الحياة على الأرض قد انمحقت. وقريباً سأصف كيف من الممكن لقرص معتم أن يكون المحرضَ المسؤول عن إزاحة المذنب المسؤول عن هذه الكارثة. ولكن أولاً سأشرح منشأ الفكرة.

استهلال

يتحقق عديد من الفوائد عند مشاطرة الفيزياء مع الجمهور من خلال الكتب والمحاضرات. ولكن لأن الوقت المستثمَر في هذه النشاطات يمكنه أن يقتص من الوقت المخصص للأبحاث الجارية، يجب عليَّ عادةً أن أرتب أولوياتي، وأن أختار أي طلبات المحاضرات يجب أن أقبلها. ولكن في بعض المناسبات المفرحة، يستفيد بحثي مما خشيتُ بنحو خاطئ أنه سيكون إلهاءً بأخذي لزيارة أشخاص ما كنتُ لأصادفهم في الأحوال العادية، أو بتقديم فكرة قد لا أفكر فيها بطريقة أخرى.

في فبراير 2013 جنيتُ مثل هذه المكافأة من دعوة عالم الفيزياء الفلكية بول دافيس Paul Davies لتقديم المحاضرة السنوية التي يعقدها في مركز بيوند BEYOND Center في جامعة ولاية آريزونا. على الرغم من ترددي في السفر، كانت للجامعة مجموعة بحث قوية في مجال الكوزمولوجيا، لذلك كنت مسرورة بالموافقة ليس فقط على إعطاء محاضرة عامة، بل أيضاً لتقديم حلقة بحث في اليوم التالي للخبراء في القسم هناك. وركّزت حلقة البحث أكثر على بحثي الأخير، الذي تناول فكرة المادة المعتمة ثنائية القرص التي سبق أن شرحتُها.

سأل الفيزيائيون بينَ الحضور أسئلةً ذكية عن النموذج – قابليته للكشف Detectability ونتائجه في إشعاع الخلفية الكونية الميكروية، على سبيل المثال. ولكنني ذَهلِتُ تماماً عندما سألني بول عمَّا إذا كان قرص المادة المعتمة هو المسؤول عن إبادة الديناصورات. أعترف بأنني في ذلك الوقت لم أفكر كثيراً – في الواقع قط – في الديناصورات في بحثي العلمي، الذي كان يتركز على الجسيمات الأولية وعناصر الكون. ولكن بول أطلعني على الدليل المحتمل عن الاصطدامات النيزكية الدورية، وعن عدم وجود تفسير لها. وسأل عما إذا كان قرص المادة المعتمة قد يجيب عن السؤال – وفي أثناء ذلك ذكَّرني بالنيزك الذي أباد الديناصورات البرية.

كان سؤال بول أفضل من أن أتجاهله. لم تكن الإجابة مباشرة، وكان علي أن أتعلم كثيراً قبل أن أجيب بنحو حاسم، ولكن بدت المادة المعتمة والديناصورات ارتباطاً من شأنه أن يُعلِّمني- والعلماء عموماً – كثيراً.

وسألت ماثيو ريس عما إذا كان مهتماً بدراسة احتمال أن الضربات النيزكية الدورية كانت تحدث بتحريض من القرص المعتم الذي اقترحناه، السؤال الذي بدا مرتبطاً بالفيزياء أكثر منه بالديناصورات.

كان ماثيو الخيار البديهي كزميل. فقد أدى دوراً رئيساً في بحث الجسيمات DDDM الأول، وهو يتمتع بذهن تقني رائع، ومنفتح العقل علمياً عندما يتعلق الأمر بالأفكار الجديدة - أكثر مما ستتوقعه من سلوكه المحافظ. فهو لا يرتكب المغالطة الشائعة بافتراض أن أي أحد - حتى الزملاء الأكبر سناً والمبالغين في ثقتهم بأنفسهم - قد خمن كل شيء على النحو الصحيح.

ولكن الأهم من ذلك، ماثيو عالم فيزياء ممتاز يتمتع بمعايير علمية عالية. عندما يفعل شيئا ما يمكنك أن تتأكد أنه على أساس راسخ. مع ذلك لم أكن متأكدة من ردة فعله تجاه اقتراح غريب ظاهرياً كهذا. وقد سُرِرْتُ جداً عندما وجد مات الفكرة مثيرة للاهتمام، وأدرك فائدتها العلمية المحتملة. كان بول ديفيس مهتماً أيضاً، ولكن كان لديه عديد من مشروعات الأبحاث الجارية، واختار بكياسة أن يكون على اتصال ولكن من دون المشاركة.

لذا بعد الإنصات بدهشة إلى أخبار تشيليابينسك، في اليوم ذاته الذي بدأنا فيه مناقشة الفكرة، ما كان لنا إلا أن نصر على تعلم كل ما يمكننا أن نتعلمه. كان هدفنا هو أن نحول هذه الفكرة المجنونة- بأن القرص المعتم يسبب ضربات نيزكية- إلى علم قابل للاختبار. بوصفنا مصممَي نماذج وعالمَين في فيزياء الجسيمات، نحاول أنا ومات أن نكون متلقيَّين لأفكار وتفسيرات جديدة. ولكننا أيضاً ندرك تماماً أهمية أن نبقى حذرَين وغيرَ متحيزَين. كانت هذه السمات جوهرية في البحث الذي سأصفه الآن.

القرص المعتم والمجموعة الشمسية

كما شرحتُ في الفصل الرابع عشر، لكي نكون واقعيين في هدفنا، قررنا أنا ومات أولاً أن نشذب دراستنا. على الرغم من فضولنا إزاء ما آلت إليه الديناصورات، تركنا في البداية التحدي الإضافي المرتبط بالانقراض، وركزنا فقط على النيازك وديناميكيات المجموعة الشمسية واحتمال الدورية Periodicity في سجل الفوهات الصدمية الملموس. وجاءت فكرة الانقراض الأولوية في المرتبة الثانية، إذ كان في استطاعتنا أن ندرس مباشرة التأثير المحتمل للقرص المعتم في المذنبات، وما إذا كان من الممكن أن يكون ذلك التأثر هو المسؤول عن الضربات النيزكية الدورية. كان باستطاعتنا بعدئذٍ أن نقرر ما مدى قدرة تنبؤاتنا عن النيازك على تفسير أي اصطدام معروف بعينه، بما فيها الاصطدام المسؤول عن الانقراض K-Pg.

تأكدنا بعدها من أن أياً من الاقتراحات السابقة عن المحرضات الدورية التي من الممكن أن تخرج أجرام سحابة أوورت عن مسارها لم تنجح في تفسير الإشارة الدورية. فلو أن آلية أكثر تقليدية كانت كافية، لما اهتم أحد، بمن فيهم نحن، بتقييم نتائج سجل الفوهات من أجل سيناريو أكثر غرابة - مهما كان مغرياً.

لكن، كما شرحتُ في الفصل الخامس عشر، المحرضاتُ التقليدية لا تعمل. بوجود قرص درب التبانة النموذجي فقط، يكون التأثير المدِّي Tidal effects من المجرة سلساً جداً والاضطرابات بفعل النجوم غير متواترة. لا فرضية التأثير المدِّي المألوف، أو المنتقم Nemesis، أو الكوكب إكس Planet X، ولا الأذرع الحلزونية لدرب التبانة تكفي لتحريض زخات مذنبات (هطْل مذنبي) Comet showers دوري أو ملحوظ. لم تثمر هذه الاقتراحات السابقة في الوصول إلى التوقيت الصحيح بين فترات اجتياز المستوى المجرِّي، أو عن الضربات النيزكية المفاجئة التي تتوافق مع سجل الفوهات. على سبيل المثال بوجود المادة العادية فقط في القرص لتؤثر في الحركة، ستكون فترة اضطراب الشمس العمودية نحو 50 أو 60 مليون سنة - وهو زمن طويل لا يتناسب مع البيانات المتوافرة.

ترك لنا هذا استنتاجين ممكنين: إما أن تكون الدورية غير حقيقية، كما يمكن أن يكون الأمر فعلاً، وإما أن البديل المنطقي الأكثر إثارة للاهتمام صحيحٌ، وأن المحرض غير تقليدي. باستبعاد الاقتراحات السابقة، كان من المنطقي أن نسأل عما إذا كان قرصنا المعتم المقترح قد ينجح في حين فشلت المادة العادية وحدها، وأن يكون هو السبب وراء الدورية المطلوبة والتغيُّر في المعدل. في الواقع يتمتع القرص المعتم بالخواص اللازمة تماماً، ليعالج القصور في قرص المادة العادية. بوجود قرص نحيف من المادة المعتمة الكثيفة يمكن أن تبرر القوى المدية للقرص الفترةَ والتبعية الزمنية لاضطرابات سحابة أوورت.

تذكَّرْ أنه خلال فترة وجودها، تخضع الأجرام في سحابة أوورت للقوة المدية لقرص المادة العادية، وأحياناً لتأثير النجوم المارة المتقطع ولكن المهم. تساعد هذه التأثيرات في تحريك الأجسام البعيدة المرتبطة بجاذبية ضعيفة في سحابة أوورت ودفعها إلى القرب من الشمس. يمكن أن يولِّد التأثيرُ المدي لمستوى درب التبانة قوة جذب أخيرة تسحب هذه الأجسام الجليدية إلى مدارات مضطربة لامركزية نحو الداخل بمسافة تعادل نحو 10 أضعاف المسافة بين الشمس والأرض، حيث من المرجح جداً هناك أن تُزيحها الجاذبية القوية للكواكب الكبيرة من موقعها في سحابة أوورت. سيؤدي هذا السحب إما إلى قذف هذه المذنبات إلى خارج المجموعة الشمسية، وإما إلى سحبها بحيث تدخل في مدارات شديدة الارتباط الجاذبي بالمنطقة الداخلية من المجموعة الشمسية. هذه الاضطرابات هي السبب في توليد المذنبات طويلة الأمد، مع دخول عديد منها إلى المجموعة الشمسية سنوياً. ولكن من حين إلى آخر تنحرف الأجرام المضطربة عن مسارها انحرافاً شديداً، وفي هذه الأوقات قد تضرب المذنبات المنحرفة الأرض.

ولكن هذا النوع من الاضطرابات لا يكفي في حد ذاته لتفسير الاصطدامات الدورية. لحدوث اصطدامات دورية، يجب أن يحدث تغير سريع في معدل الاضطرابات في سحابة أوورت على فترات منتظمة. إضافة إلى ذلك، لتتوافق مع الدليل المتوافر لدينا، لا بد من أن تتراوح هذه الفترة ما بين 30 و35 مليون سنة. إذا فشل واحد فقط من هذه المعايير، فلن يفي التفسير المقترح للاصطدامات النيزكية الدورية بالغرض. كما لن يستوفي أي معيار من المعايير الضرورية لأي اقتراح تقليدي.

لكن إضافة القرص المعتم الأكثر كثافة ونحافة يعالج هاتين المشكلتين بنحو ملائم جداً. بمجرد أن تتقبل الحقيقة الممكنة للاصطدامات النيزكية الدورية، ستجد أن فكرة القرص المعتم في الحقيقة هي فكرة واعدة حقاً. يمارس القرص المعتم تأثيراً أشد وأسرع اختلافاً مع مرور الزمن من القرص التقليدي للمستوى المجرِّي – أي المتطلبين الرئيسين لخلق زيادة في كثافة المذنبات.

مع وجود القرص المعتم في مستوى درب التبانة، ستكون فترة تذبذب الشمس أقصر من الفترة التي يسببها قرص درب التبانة التقليدي وحده، لأن قوة الجاذبية-مع إضافة مادة القرص المعتم- ستكون أقوى. إضافة إلى ذلك، وفقاً لتقديرات كثافة المادة الحالية، تتذبذب المجموعة الشمسية فقط نحو سبعين فرسخاً فلكياً Parsecs إلى أعلى وأسفل المستوى المجري – وهو نطاق محدود أكثر بكثير من سمك قرص المادة العادية الكامل. بينما سيكون للقرص المعتم النحيف، الذي سيشمل المجموعة الشمسية عبر جزء كبير من مساره، تأثير كبير في حركة المجموعة الشمسية في أثناء تذبذبها إلى أعلى وأسفل المستوى.

الميزة الأخرى لقرص معتم نحيف هي أن المجموعة الشمسية تستطيع المرور من خلاله بسرعة كافية لإثارة ارتفاع في معدل المذنبات الذي يستمر مليون سنة تقريباً. بسبب تأثيره الكبير المُعتمِد على الزمن Time-dependent influence، يحفز القرص المعتم حدوث مزيد من الاضطرابات في كل مرة تعبر فيه المجموعة الشمسية المستوى المجري، مما يؤدي إلى زخات مذنبات بانتظام – في أثناء كل فترة عبور للمستوى- والتي ما كانت لتحدث إلا نادراً لولا ذلك عند اقتراب النجوم اقتراباً شديداً. يحدث التأثير المدي المُعزِّز عندما تجتاز المجموعة الشمسية المنطقة الضيقة التي يحتلها القرص المعتم. فقط في أثناء هذا العبور، وربما في المليون أو المليوني سنة اللاحقة ستزداد الضربات المذنبية.

عندما تمر المجموعة الشمسية عبر القرص المعتم، في هذا النطاق الزمني، وتخضع لقوى مدية مُعزَّزة – أي زيادة في قوة التأثير إن حدثت بالسرعة الكافية- فقد تُزاح الأجسام الجليدية في سحابة أوورت، وقد يندفع عدد قليل منها نحو كوكبنا بسرعة تعادل نحو 50 كم/ث. ولا تكاد تخرج عن مسارها الصحيح بهذه الطريقة، حتى تصبح الرحلة سريعة – ربما مجرد بضعة آلاف سنة. ولكن الاضطراب الذي سبب حدوثها في المقام الأول يحدث ببطء أكثر- عموماً يستغرق ما بين فترة وعدة فترات مدارية للانطلاق. هذا يعني أنه في فترة زمنية تتراوح بين نحو مئة ألف سنة ومليون سنة، سيتحدد مصير المذنبات التي وصلت إلى تخوم الشمس، وقد يكون بعضها السبب في زخات المذنبات التي تضرب الغلاف الجوي للأرض أو الأرض نفسها.

رسمنا أنا ومات المسار المتوقع، وكان السيناريو ناجحاً – على الأقل ضمن القيود التي فرضتها البيانات المحدودة وغير الراسخة إلى حد ما. ولكن كان هناك تدقيق لم نُجْرِه بعد، وفقاً لما أشار إليه مُحكِّم راجَع بحثنا المقدم للنشر في مجلة الفيزياء المرموقة رسائل المراجعات الفيزيائية Physical Review Letters. وهكذا، إضافةً إلى تحديد حركة المجموعة الشمسية في وجود القرص المعتم، حسَبنا ارتفاع وانخفاض كثافة بيئة المجموعة الشمسية في أثناء مرورها من خلاله. أردنا أن نعرف الكثافة لأننا افترضنا أنه مهما كان الذي أثار اضطراب سحابة أوورت فسيكون متناسباً مع هذه الدرجة من تركيز المادة. في المحصلة مزيد من الكتلة يعني مزيداً من التأثير المدِّي، مما يجب أن يعني مزيداً من الاضطراب. لذلك افترضنا أن الكثافة ستكون بمنزلة الوكيل Proxy لمعدل الضربات النيزكية، كما اتضح بالفعل.

ولكننا لم نكن حتى تلك النقطة قد أكدنا صراحةً أن التشويه المدي الذي يمارسه القرص المعتم حيال الأجسام الجليدية في سحابة أوورت كان كافياً لحدوث زخات المذنبات بالمعدل الصحيح. من حسن حظنا، اضطلع سكوت تريماين Scott Tremaine وجوليا هيسلر Julia Heisler بكثير من الأعمال الصعبة والضرورية قبل عَقد من الزمن، لذا تمكنا ببساطة من تطبيق نتائجهما. وبالفعل كان افتراضنا صحيحاً. تولِّد الكثافة المعززة نوعاً من الجاذبية اللازمة لانزياح المذنبات ضمن النطاق الزمني المناسب.

كنت معجبة في الواقع باقتراح المُحكِّم المفيد. في هذه الأيام عادةً ما تكون تقارير المحكمين، التي يراجع فيها الأقرانُ الذين من المفترض أنهم خبراءُ الأوراقَ البحثية قبل الموافقة عليها للنشر، إما موافقات مؤيِّدة من دون تمحيص، وإما وسيلة لمؤلفين منزعجين يبحثون عن مزيد من الاقتباسات من أوراقهم البحثية. علَّمنا اقتراح هذا المُحكِّم في الواقع بعضَ الفيزياء. كانت النبرة رافضة لما توصلنا إليه، ولكننا تعلمنا شيئاً من تتبع الأمور المنتقدة وحلّها. كان علينا أن نتعامل مع بعض الانتقادات- المضللة أيضاً – ولكن نظراً إلى أننا كنا حريصين على تفحُّص الأوراق البحثية والخبراء مسبقاً، استطعنا تحديد أوجُه القصور في هذه الانتقادات.

في النهاية، حسبنا أنا ومات قيَم الكثافة والسمك المفضلة للقرص المعتم التي تتطابق مع سجل الفوهات، ووجدنا أنها تتوافق مع نموذجنا للجسيمات DDDM الذي أعددناه في السابق، والذي عرفنا حينها أنه يتوافق مع القياسات المجرِّية. ولم يكن الابتكار الجديد والأفضل الذي وجدناه أنا ومات في بحثنا هو أن وجود القرص المعتم ممكن فحسب، بل كان في الواقع مفضلاً إذا أخذتَ القرص على محمل الجد كمحفِّز للضربات المذنبية.

يجب أن تكون كثافة سطح القرص المعتم نحو سُدس كثافة المادة في القرص العادي. هذا كافٍ ليكون مثيراً، ولكنه ليس كافياً ليطغى على الظواهر المفهومة حالياً. إنها مقدار كبيرٌ من المادة المعتمة – ليست واحداً على مليون، على سبيل المثال، ولكن نسبة معينة. في حال وجود هذا المُكوِّن المعتم، سيكون كبيراً بما يكفي ليكون له تأثير قابل للقياس، ومن ثم سيكون جديراً بالاهتمام. إضافة إلى أن سُمك القرص قد يكون أقل من واحد على عشرة من سُمك قرص المادة المعتمة – أقل من عدة مئات من السنوات الضوئية عرضاً مقارنة بالمادة العادية التي يصل سمكها إلى نحو 2,000 سنة ضوئية. مجدَّداً نحافةُ القرص المعتم هي ما يفسر لمَ قد يُحفِّز تأثيرات دراماتيكية بنحو دوري.

وجدنا أن القرص المعتم بالكثافة الصحيحة مرجح بمعامل يعادل ثلاثة أضعاف. كان تأثير البحث في مكان آخر Look-elsewhere effect، الذي ذكرتُه في الفصل الخامس عشر، مساهماً رئيساً في الوصول إلى هذا الاستنتاج الجديد بدعم إحصائي أفضل. مع وجود نموذج محدد لما يمكن أن يحفِّز الضربات الدورية، لا يمكننا التنبؤ بالفترة الزمنية فحسب، بل يمكننا أيضاً توقُّع ذلك بموثوقية أكبر. في الواقع امتد اهتمامنا في البحث إلى ما بعد تبيان أن وجود قرص معتم سينجح في تفسير زخات المذنبات الدورية بطريقة تعجز فيها العناصر المجرية العادية عن ذلك. إذ أردنا أن نبين وجهة نظر أخرى، لها علاقة بالإحصاء، وكيفية تقييم أهمية هذه النتائج أو أي نتائج أخرى.

كما سبق أن ناقشنا في الفصل الرابع عشر، حاولتْ معظم الأبحاث في الدورية أن تطابق وظيفة دورية لحركة الاهتزاز العمودي للمجموعة الشمسية – المَوْجة الجَيْبِيّة (منحنى دالة الجيب) Sine wave، على سبيل المثال – مع البيانات. قد يكون هذا مثيراً للاهتمام، ولكنه لا يحيط بالقصة بكاملها. ليس علينا أن نخمن حركة المجموعة الشمسية. لو علمنا كل شيء عن المجرة وعن موقع Position الشمس الأولي، وسرعتها Velocity، وعجلتها Acceleration، لاستخدمنا قوانين نيوتن في الجاذبية لحساب حركة الشمس والتنبؤ بالمدة التي يجب أن نتوقعها. ففي المحصلة، حركة المجموعة الشمسية ليست عشوائية، ولكن يجب أن تكون متوافقة مع ديناميكياتها الضمنية. حتى مع المعرفة الناقصة لتوزُّع الكثافة ومقاييس الشمس، يبقى نطاق المسارات المحتملة – ومنه الفترات المحتملة – مقيداً.

أدرجنا- أنا ومات- ما نعرفه عن كثافات المادة المعروفة في القرص المجري – لنأخذ بعين الاعتبار النطاق الكامل للقيم المحتملة التي تدعمها البيانات الحالية – وأضفنا مساهمةَ مادة القرص المعتم. كان هدفنا هو التحققَ مما إذا كان هناك دليل على معدلات فوهات دورية تتطابق مع حركة المجموعة الشمسية بعد أخذ كل شيء نعرفه عن عناصر القرص المقيسة- النجوم، الغاز، الخ... – بعين الاعتبار، إضافة إلى عنصر القرص المعتم الذي اقترحناه.

تُقيد المساهمات المقيسة للمادة العادية نطاق المسارات المحتملة التي يمكن أن تتخذها المجموعة الشمسية، لأن جاذبية المادة في القرصين- العادي والمعتم على حد سواء – تؤثر في الشمس وتؤثر في حركتها، ومن ثم تقلل من أثر تأثير "البحث في مكان آخر". استخدمتُ أنا ومات الكثافات المقيسة لتنبُّؤ الحركة الدورية للمجموعة الشمسية وقارنا عدد مرات اجتياز المستوى المجرِّي مع عدد مرات تشكُّل الفوهات المسجلة للتحقق من مدى مطابقتها. على الرغم من أن التوقعات من دون نموذج أساسي ليست حاسمة بقدر كافٍ، وجدنا أنه عند أخذ القياسات الحالية بعين الاعتبار، تُرجح الإحصاءات ضربات نيزكية دورية نحو كل 35 مليون سنة. تشير تحسينات البيانات الحديثة إلى أن الفترة قد تكون أقصر حتى – ربما نحو 32 مليون سنة.

كان القرص المعتم حاسماً في نجاح السيناريو وتوليد معدل اصطدام أفضل تطابقاً. للنظر إلى القصة من ناحية أخرى، مع التطابق الأفضل بين بيانات الفوهات وحركة المجموعة الشمسية، القرص المعتم مفضَّل في الواقع. لا بد من تحليل البيانات المستقبلية مع أخذ هذا النموذج بعين الاعتبار لكي يثمر أفضل دلالة إحصائية Statistical significance. إما ستعزز النتائجُ نتائجَنا وإما تدحضها.

والديناصورات

بعد أن أعددتُ أنا ومات كل الحسابات وقُبِل بحثُنا للنشر في مجلة رسائل المراجعات الفيزيائية، نشرنا نتائجنا في أرشيف المجلة Journal repository الذي يسمح بالدخول المباشر على الإنترنت للأوراق البحثية التي تُعرف بالمُسوَّدات السابقة للطباعة Preprints. وأجرى مات خطوات التقديم المطلوبة. وأطلقنا على بحثنا عنواناً محافظاً: "المادة المعتمة كمحفِّز للاصطدامات المذنبية الدورية". ولكن لدهشتي، كتب مات في قسم

التعليقات – المستخدَم عادة لوصف الهيئة Format أو أي مراجعات Revisions على التقديم – ليذكر في "4 أشكال توضيحية، لا ديناصورات". وقد ظننتُ ذلك مسلياً جداً لأننا تجنبنا بمثابرةٍ أيَّ ذكر صريح للديناصورات في بحثنا، الذي ركز على سجل الفوهات وعن ارتباطه المباشر بالفيزياء. ولكن بالطبع كان هذا الارتباط في ذهننا طوال الوقت حتى إننا أشرنا إلى ورقتنا البحثية بأنها "الورقة البحثية الديناصور" على سبيل المزاح. أعتقد لو أنني أوليتُ مزيداً من الانتباه، لما فوجئتُ في اليوم التالي بدرجة الاهتمام ببحثنا على الإنترنت، الذي تداوله عديد من المدونات Blogs ومواقع مجلات – بما فيها جزء "Boffins" – والمرفق دائماً تقريباً ببعض الصور التوضيحية المسلية.

ولكن هذا يجعلني أعود إلى الديناصورات. بعد أن أسسنا محاولة أولى على الأقل للجمع بين البيانات ونماذج تتنبأ بالاصطدامات النيزكية، مع معرفتنا بأن هذه ليست الكلمة الفصل ولكن ستتحسن من القياسات المستقبلية، بحثْنا بعدئذٍ لنرى مدى تطابق نموذجنا مع توقيت حادثة تشيكشولوب. أظهرت حساباتنا، بالاعتماد على القياسات المحسنة للمادة المعتمة في قرص درب التبانة، أن الاصطدامات النيزكية يجب أن تحدث كل 30 إلى 35 مليون سنة تقريباً. ولأننا عبرنا من خلال المستوى المجرِّي خلال المليوني سنة الماضية، ربما جاء فعلاً مذنب شارد من سحابة أوورت- عبر دورة تذبذب كاملة Complete oscillation (عبور قرصين) في الماضي مندفعاً نحو الأرض قبل 66 مليون سنة، في زمن الانقراض K-Pg، ليسبب الدمار الهائل. على الهامش، لو أننا مررنا من خلال القرص في أقل من مئة سنة مضت، يمكننا أن نكون في نهاية تدفق مذنبي شديد ولدينا احتمال أن نشهد اصطدامات قوية حالياً. ولكن الأرجح بكثير أن الأرض قد مرت من خلاله قبل زمن أطول، ولن نشهد حادثة تشيكشولوب أخرى قبل ثلاثين مليون سنة مقبلة، إلا في حال حصول حادثة عشوائية فعلاً وغير محتملة إلى حد بعيد.

بسبب اللايقين في موقع الشمس والافتقار إلى معرفة الفترة الدقيقة، يمكننا فقط أن نخمن بنحو تقريبي أوقاتَ عبور القرص. إذا عبرت الأرض المستوى المجري قبل مليوني سنة، فستكون فترة تذبذب بنحو 32 مليون سنة مثالية لتوليد حدث وقع قبل 66 مليون سنة. اقترح تحليلُنا الأولي فترة بنحو 35 مليون سنة، وهي فترة أطول من أن تتطابق مع توقيت تيشكشولوب – على الرغم من اللايقين في النموذج، وفي طول فترة ضربات المذنبات الشديدة فإن النموذج يسمح بتوافق معقول. غيرَ أن نموذجنا المحدَّث عن قرص درب التبانة، الذي يأخذ في الحسبان القياساتِ الأخيرة لعناصر المجرة، قلص الفترة – مما أدى إلى تطابق أدق مع فترة انقراض K-Pg. ولكن حتى مع النموذج الأولي الذي استخدمناه لتنبُّئِنا الأولي، هناك احتمال منطقي بأن تنبؤ القرص المعتم يتوافق مع حادثة تشيكشولوب.

السبب الرئيس لعدم دقة نتائجنا بقدر كافٍ بعد هو أن قياسات المادة في درب التبانة قد تغيرت منذ أن أجرينا تحليلنا الأولي. كما أننا لم نضطلع بعد بنمذجة كامل البيئة المجرية المعتمدة على الزمن بنحو كامل، مثل الأذرع المجرية، غير المعروفة جيداً. لا يكفي التباين في الكثافة بفعل هذه التأثيرات لتحفيز إطلاق الضربات النيزكية.

ولكنها قد تكون كافية لتغير تنبؤ النموذج الدقيق بموعد حدوث هذه الضربات بما لا يزيد على مجرد بضعة ملايين من السنين. هناك عوامل أخرى تساهم في اللايقين في الأوقات الدقيقة المتوقعة لزخات المذنبات المُعزَّزة. تستغرق المجموعة الشمسية مليون سنة تقريباً لعبور المستوى المجري – وأطول من هذا إذا كان القرص أكثر سُمكاً. إضافةً إلى ذلك هناك فترة زمنية تصل إلى نحو عدة ملايين سنة تفصل بين حدث الإثارة الأولية والاصطدام النيزكي الفعلي بالأرض. ثالثاً سِجِل الفوهات ودقة التأريخ ضعيفان. والعثور على مزيد من الفوهات أو تأريخها بنحو أدق سيساعد – وإن كانت اكتشافات الفوهات لا تظهر إلا بنحو غير منتظم. ليست الفوهات فحسب، بل الغبار الذي ينحبس في الصخور، قد يساعد أيضاً على إنشاء سجل أكثر دقة عن الأوقات التي ضربت فيها المذنبات الأرض.

قد يأتي الدليل على وجود دورية كل 30 إلى 35 مليون سنة في الحركة العمودية للشمس نحو المستوى المجري وبعيداً عنه من اتجاهات غير متوقعة أيضاً. بعد أن كتبنا أنا ومات ورقتنا البحثية، أخبرني مصادفةً زميلٌ عالِمُ في فيزياء الجسيمات، وهو كان يعلم ولعي بالكوزمولوجيا والجيولوجيا والمناخ – ولكنه لم يكن يعلم بـ"الورقة البحثية الديناصور" وقتها – عن عمل نير شافيف Nir Shaviv، وزملاؤه الذين درسوا المناخ على مدار دهر البشائر الذي امتد 540 مليون سنة. من اللافت للنظر أنهم وجدوا اختلافاً في المناخ خلال فترة 32 مليون سنة – يشبه بنحو مذهل الفترة التي حدَّدناها في أبحاثنا. وإذا صمدت نتائج شافيف أمام المراجعات، وإذا حُدِّدت هذه الدورية في المناخ على أنها بالفعل نتيجة حركة الشمس عبر المستوى المجري، فستكون فترة 32 مليون سنة أيضاً الدليل على القرص المعتم؛ لأن المادة العادية وحدها لن تكفي للتوصل إلى مثل هذه الفترة الزمنية القصيرة نسبياً بين أوقات عبور القرص.

طبعاً نحن لسنا في حاجة إلى الغوص في الماضي لرؤية تأثير المادة المعتمة. إذا كانت المادة المعتمة تحتوي فعلاً على عنصر متفاعل يغير تركيب توزُّع المادة في الكون، فسنعلم ذلك قريباً – ربما حتى قبل أن تينع ثمار أبحاث المادة المعتمة الأخرى. فقط نطاق محدد من كثافات المادة المعتمة يمكنه أن يفسر بيانات الفوهات. من شبه المؤكد أن القياسات المستقبلية ستقلص نطاق التنبؤات المحتملة، فإما أن تثبت اقتراحنا وإما أن تدحضه.

يبين التحليل الذي أجريتُه مع طالبي إيريك سابقاً أن المادة المعتمة بالسمك والكثافة المطلوبين مسموح بها بفضل الملاحظات الرصدية المتوافرة حالياً. وستثبت بيانات القمر الاصطناعي غايا GAIA وجود القرص، وكثافته، وسمكه بنحو أفضل. ولن يكاد ينتهي هذا القمر الاصطناعي من رسم خريطته ثلاثية الأبعاد عن أقرب النجوم من درب التبانة، حتى يتحدد وجود – أو غياب – القرص المعتم بنحو أفضل. من خلال هذا الطريق غير المباشر – يمكننا أن نتعلم مزيداً – ليس فقط عن المجرة والمادة المعتمة، بل عن ماضي المجموعة الشمسية أيضاً. إذا أثبتت بيانات غايا وجود قرص بالسمك والكثافة الصحيحين، فسيكون دليلاً قوياً على قابلية نجاح اقتراح الفوهات.

العبارة الختامية الأفضل بالطبع كانت ستكون القول إننا حسبنا التاريخ الدقيق لانقراض الديناصورات بهامش لايقين ضئيل، لكي نكون واثقين بالنتائج. بَيْدَ أن هذا موضوع معقد وينطوي على عديد من القياسات الصعبة. ومع ذلك يظل التطور الذي حققه العلماء خلال الـ 50 سنة الماضية مذهلاً. ظلت المادة المعتمة مراوغة في عدة أوجه أكثر من الأرض والمجموعة الشمسية وعديد من العناصر المرئية الأخرى في الكون والأسهل في الرصد بكثير. ولكن من خلال البحث الذي وصفتُه يجد علماء الفيزياء طرقاً جديدة لترصُّدها. ومهما كانت النتيجة، يمكننا أن نكون على ثقة بأن المجرة والكون، والعمليات الداخلية في المادة نفسها، لا تزال تخبئ لنا كثيراً من المفاجآت الرائعة.

الخاتمة: النظر إلى الأعلى

لقد كنتُ محظوظة بتلقي الدعوات للمشاركة في مؤتمرات مع قادة من تخصصات متنوعة – تمتد من تجارة الأعمال والقانون والسياسة الخارجية إلى الفن والإعلام والعلوم بالطبع. حتى عندما يكون لديَّ منظور يختلف عن المتحدث الآخر، يحفِّز النقاش دائماً نظرة جديدة في نطاق واسع من المواضيع المهمة. ولكن أفضل سؤال – بصورة خاصة فيما يتعلق بأبحاثي – لا يأتي دائماً من المشاركين في المؤتمرات. ففي إحدى المرات دار حديث ممتع حول الفيزياء مباشرة بعد انتهاء المؤتمر، عندما فاجأني جيك – السائق الشاب الذي كان يُقلني إلى مطار مونتانا المحلي – باهتمامه العميق.

عند معرفتهم أنني عالمة فيزياء، يشعر كثير من الناس بأنهم مضطرون إلى إخباري عن وجهة نظرهم حول الموضوع – سواء أكان حباً أم كرهاً أم انبهاراً أم ارتباكاً. أجد هذا الأمر مضحكاً قليلاً. في النهاية لا يشعر الجميع بحاجتهم إلى إعلام محامٍ مثلاً عن أفكارهم حول الفقه القانوني. ولكن هذه الأحاديث الاعترافية في الفيزياء تثمر أحياناً. أخبرني جيك أنه قبل عدة سنوات استمتع بمقرر جامعي في الفيزياء كان يُدرَس في مدرسته الثانوية في أوريغون، وأنه الآن متلهف إلى تعلم مزيد. على الرغم من أنه لم يعد يأخذ دروساً الآن، أراد أن يعرف مزيداً عن عديد من التطورات التي حققها علماء الفيزياء منذ ذلك الحين حيال فهمنا للكون.

ولكن جيك لم يسأل فقط عن التطورات الحديثة. بل أراد أن يعرف أيضاً عن مجال الفيزياء الذي درسه في ضوء التطورات الحديثة. فشرحتُ له أن تطورات القرن العشرين علَّمتنا، على سبيل المثال، أن قوانين نيوتن – على الرغم من أنها لا تزال تقديرات دقيقة إلى حد بعيد في البيئات المألوفة – لا تنطبق عند تطبيقها على البيئات عالية السرعة، أو المسافة القريبة، أو بيئات عالية الكثافة حيث تسيطر هناك النسبية الخاصة Special relativity أو ميكانيكا الكم Quantum mechanics أو النسبية العامة General relativity.

بعد تأمل هذا برهة، طرح جيك سؤالاً عميقاً. سألني ماذا سأفعل بمعرفتي لو استطعتُ العودة بالزمن، متسائلاً عما إذا كنتُ سأخبر الناس الذين ألتقيهم هناك عن التطورات الحديثة التي نعلم عنها الآن.

أدرك جيك الوجهين المهمين للمعضلة. الأول ما إذا كان أحد سيصدقني – أو ما إذا كانوا سيعتقدون أنني مخبولة. في المحصلة، من دون الدليل التجريبي المساند الذي وصلنا إليه فقط بفضل التقنيات الأكثر حداثة، قد تبدو الظواهر المذهلة والارتباطات التي اكتشفها العلماء واستنتجوها في القرن الماضي ضرباً من الجنون. فهي تنتهك منطق الحدس السائد في الدوائر الاعتيادية.

ولكن ربما كان الوجه الآخر من المعضلة أكثر إلحاحا. تساءل جيك عما إذا كان الناس-حتى لو استمعوا لي وصدقوا الرؤى الجديدة- سيفزعون ويتجاهلونها أو – على النقيض من ذلك – سيطبقونها بسرعة قبل أوانها. كان حدسه الغريزي الأول أنني يجب أن أحتفظ بالمعلومات لنفسي التي أتخيلها مسافرةً عبر الزمن إلى الوراء، معللاً بأن العالم سيكون أفضل حالاً لو تركناه يتطور كما تطور فعلاً – من دون طرق مختصرة للوصول إلى المعرفة العلمية.

نظراً إلى المقاومة المعتادة من المجتمع للتفكير طويل الأمد، كان جيك قلقاً من أن التدفق المفاجئ للمعلومات قد يكون خطيراً. لم يكن يظن أن التغيير سيئ. ولكنه كان قلقاً عندما رأى إخوانه الأصغر أسرى

ألعاب الفيديو والهواتف الذكية، متخلِّين عن التمارين والاستكشاف والخروج إلى الأماكن المفتوحة التي استمتع هو بها عندما كان في سنهم. كما أعرب عن قلقه حيال مثال بلدته، حيث رأى الصناعات تندفع للاستيلاء على الموارد بمجرد تقديم تقنية جديدة، من دون الاهتمام بالتبعات المحلية أو حتى العالمية. عندما تَفكَّر جيك بالعواقب غير القابلة للعكس – لطبيعة منطقته ولطريقة حياة عائلته – التي رآها تأخذ مجراها خلال فترة حياته القصيرة، وَجد أن المجتمع سيكون أفضل حالاً ربما لو أنه أخذ الزمن الكافي ليتكيف مع الاكتشافات العلمية المهمة أو التغيرات التقنية من خلال تطوير استراتيجيات شاملة وطويلة الأجل بنحو مدروس.

استعرضَ هذا الكتابُ كيف أن عدة اضطرابات رئيسة لا يمكن السيطرة عليها في تاريخ الأرض زعزعت استقرار كوكبنا بنحو عميق. حدث أحد هذه الاضطرابات بفعل أصل فضائي قبل 66 مليون سنة عندما سبَّب مذنب مندفع بسرعة – وهو ربما يكون قد نتج بسبب المادة المعتمة- انقراضاً كبيراً. ربما بعد 30 مليون سنة تقريباً، سيسبِّب مذنبٌ آخر ذلك أيضاً. من المذهل فهم مثل هذه الأحداث الرائعة، ولهذا السبب ركزت عليها في هذا الكتاب وأواصل دراستَها في بحثي الحالي.

ولكن قد يكون لفهم تأثيرها في الكوكب وفي الحياة فوائدُ أخرى – مساعدتنا على استباق عواقب بعض الاضطرابات التي نسبِّبها لبيئتنا حالياً، مثلاً. على مقياس زمني يرتبط بالحضارة وتنوع الحياة الحالية على الأرض، ليس المذنب المنحرف عن مساره هو شاغلَنا الأكثر إلحاحاً، بل التغيرات التي يُحدثها الانفجار السكاني عندما يستغل موارد الأرض بعجلة. بل ويمكن مقارنة التأثير بتأثير مذنب يتحرك ببطء – ولكن هذه المرة سيكون الاصطدام من صُنعنا نحن. وعلى النقيض من الاصطدام المندفع من التخوم البعيدة للمجموعة الشمسية، فإن لدينا القدرة على السيطرة على التغيرات التي تحدث الآن.

إن دراسة المادة المعتمة ليست الطريق الأكثر وضوحاً لمعالجة مثل هذه المخاوف. غيرَ أن كتاب المادة المعتمة والديناصورات إنما يتحدث عن محيطنا بأكبر معانيه – بيئتنا الكونية والرؤى المدهشة التي حققتها التطورات العلمية لنا – وما قد تكشفه لنا التطورات المستقبلية. ولكن التفكير في المادة المعتمة قادني إلى التفكير في مجرتنا، الأمر الذي حداني على معرفة مزيد عن المجموعة الشمسية، مما دفعني إلى التفكير في المذنبات، وهذا قادني إلى فهمٍ أفضل لانقراض الديناصورات، ليدعوني إلى أن أتأمل رهافة التوازن الذي يسمح للحياة – بمعنى الحياة الموجودة على الأرض حالياً – أن تزدهر. إذا عبثنا بهذا التوازن، فربما قد نبقى والكوكب حتماً سيفعل. ولكن من غير الواضح ما إذا كانت الأنواع التي نعيش معها ونعتمد عليها ستصمد في وجه أي تغيرات جذرية لاحقة.

الكَون موجود منذ 13.8 بليون سنة، وقد دارت الأرض نحو أربعة ملايين ونصف المليون دورة حول الشمس. زيّن البشر الكوكبَ منذ مليوني سنة فقط، وبزغت الحضارة منذ أقل من عشرين ألف سنة. مع ذلك في حياتي، تضاعف تعدادُ السكان، مما أضاف أكثر من أربعة بلايين شخص إلى الكوكب. عندما نتسرع في استغلال موارد الأرض – مما يؤثر تأثيراً عميقا في الكوكب والحياةِ فيه – فإننا نخرب وبسرعةٍ العمل الكوني الذي استغرق ملايين أو حتى بلايين السنين. قد لا ندرك التهديدات بسرعة في فترة حياة الإنسان القصيرة. ولكن قد يساعد الحذَر عند التحرك قُدُماً على ابتكار طُرق مُثلى لاستخدام المعلومات والتطورات في المستقبل.

نحن نحب أن نفكر وكأننا مرنون، ولكن من المرجَّح أن الوضع الحالي للعالم أقل استقراراً مما نظن. فتغيير وتدمير الموائل والغلاف الجوي بالمعدل الحالي يؤثر في التنوع البيولوجي، ومن الممكن أن يؤدي إلى انقراض سادس. وعلى الرغم من أن البشر لن يختفوا في أي وقت قريب، فقد تختفي جوانبُ مهمة لأسلوب معيشتنا. إن التعديلات التي نُحدثها – أو حتى محاولاتنا في تقديم الحلول- قد تهدد بيئتنا، فضلاً عن استقرارنا الاجتماعي والاقتصادي. على الرغم من أن النتائج قد تكون مفيدة في نهاية المطاف من ناحية عالمية، فإنها لن تكون كذلك بالضرورة بالنسبة إلى الأنواع الحيّة التي تعيش على الأرض الآن.

يمكنُنا أن نحاول هندسةَ بعض نواحي بيئتنا، ولكن العالم عبارة عن نظام غاية في التعقيد، يستخدم عديداً من المزايا الإعجازية في ظاهرها – ولا نفهم إلا القليل منها فقط حالياً. حتى إن استطاعت التكنولوجيا

حل بعض المشكلات، فسيكون من الصعب بأي حال من الأحوال أن تجاري معدل التغير المتسارع. ومن دون الابتكارات المتتالية لتغيير المعادلة بنحو جوهري، ستكون النتيجة توسُّعاً غير مستدام نضطر فيه إلى التخلي عن شيء ما. ومن الضروري وجود مناخ سياسي واجتماعي واقتصادي مساند تستطيع فيه التكنولوجيا أن تتكامل في استراتيجية شاملة، هذا إذا أردنا تحقيق الاستجابة المثلى. من الواضح أن التحديات شاقة، ولكنها يجب ألا تمنعنا من شق طريقنا نحو هذا الهدف الجديد بالاهتمام.

يبدأ النمو الأُسي Exponential growth ببطء نسبي ثم ينطلق تصاعدياً بتسارع. وهكذا، فإن الموارد اللازمة للحفاظ على الوضع الحالي تفوق أي شيء عرفناه في الماضي. في النظام الإيكولوجي Ecosystem المتوازن بدقة، ومع بنيتنا التحتية المعقدة والهشة، حتى أصغر الاضطرابات يكون قادراً على توليد تأثيرات هائلة. من المهم أن نسأل أنفسنا عما إذا كان من الأفضل أن نخطط طريقة نُموِّنا بنحو مختلف، أو على الأقل توقع التغييرات التي يمكن تصوُّرها بطريقة مدروسة دراسة أعمق. حتى البابا فرانسيس حذَّر في رسالته البابوية في العام 2015 من النشاط البشري الأسرع والأكثر كثافة فيما أسماه "التسريع" Rapidification. على الرغم من أن بعض جوانب التغيرات المقبلة ستكون مفيدة، فإن العواقب الضارة المحتملة تستوجب توقُّعها أيضاً. بالنظر من الخارج – أو من الداخل – قد نبدو قصيري النظر.

لا تُسئْ فهمي. أنا أؤمن بالتقدم. ففي المحصلة تبقى المعرفة هي أمراً رائعاً. ولكنني أؤمن أيضاً بتحمل مسؤولية توظيف التطورات بحكمة، وهو ما يعني أحياناً اعتناق المنظور طويل الأمد. ليس من المفترض على النوع البيولوجي الذكي أن يُقيم وجوده على المنافسة في تدمير الموارد النادرة التي استغرقت بلايين أو على الأقل ملايين السنين لتتكوَّن. على الرغم من أن التطبيقات التكنولوجية قد تكون مفيدة أو مضرة – أحياناً هي كذلك سهواً- تمنحنا المعرفة المتزايدة القدرة على صُنع آلات مرغوب فيها، وتوقُّع تنبؤات أكثر دقة، وإيجاد حلول ناجعة لمشكلات محتملة، وتقييم قيود فهمنا الحالي. الأمر يعتمد علينا وعلى توظيف معرفتنا توظيفاً جيداً.

علينا أن نتذكر أن نطاق تطبيق الاكتشافات العلمية نادراً ما يكون واضحاً في البداية. مع ذلك يمكن أن تغير التطورات العلمية عالمنا خُلسة، ومعها نظرتنا إلى العالم من حولنا. في حال تطبيقها بنحو سليم، يمكنها أن تثمر فوائد جمة. حتى الرؤى العديدة التي تضرب بجذورها عميقاً في النظريات المجردة – أبحاث العلوم الأساسية التي لم يظن أحد في البداية أنه ستكون لها تطبيقات عملية – كان لها تأثير عميق في عالمنا.

الدراسات الجينية، التي تهدف حاليا إلى معالجة السرطان، كانت متأصلة في بحث الحمض النووي DNA الذي كان يتركز في البداية على أسئلة نظرية. كما طورت معدات التصوير بالرنين المغناطيسي من فهمنا للنواة الذرية. وأطلقنا الطاقة الذرية، التي تُستخدَم للخير والشر، من معرفتنا لبنية الذرة. كما نمت الثورة الإلكترونية من تطور الترانزستور، الذي تطور من فيزياء الكم. كان الإنترنت منتجاً ثانوياً لحاسوب العالِم تيم بيرنرز-لي Tim Berners-Lee في عمله في سيرن CERN – مركز مُعجِّل فيزياء الجسيمات الذي يستضيف الآن مصادم الهادرونات الكبير LHC – لتحسين التواصل والتنسيق بين العلماء في أمم مختلفة. نظام الملاحة العالمي GPS – واسع الانتشار حاليا – يقوم على نظرية آينشتاين في النسبية. لم يعرف أحد حتى أن الكهرباء ستكون ضرورية عندما اكتُشفت أولَ مرة، مع ذلك فهي جوهرية بالنسبة إلى طريقة معيشتنا الحالية.

عندما بدأ دراساته، ظن الجيولوجي وولتر آلفاريز Walter Alvarez، الذي حاز والده جائزة نوبل في الفيزياء، أن الجيولوجيا كانت مملة مقارنة بالفيزياء. كان الجيولوجيون عموماً يعيدون بناء أنماط الأرض والأنهار المملة، في حين كان الفيزيائيون في القرن العشرين يغيرون نظرة الناس نحو العالم وعملياته بنحو جذري. ولكن مع الفهم الأفضل للصفائح التكتونية، وعلم طبقات الصخور، والتطور الجيولوجي، حصل اكتشاف واستغلال مخزون من النفط والطبقات الرسوبية المعدنية. ما بدأ كفضول بليد تحول إلى أدوات للبحث عن النفط والمعادن. بدأ التحول في القرن الثامن عشر، ولكن ازدادت أهمية الجيولوجيا في القرن العشرين. وهكذا قدمت الجيولوجيا أرباحاً عظيمة إلى عالمنا، حيث غذَّت حرفياً النشاطات الصناعية – ومنها اقتصادنا وأسلوب معيشتنا – ولكن كذلك عديد من مشكلاتنا البيئية الحالية أيضاً.

لكن، كما تبين أسطورة ألفاريز وغيره، لم تغذِّ التطبيقات الصناعية وحدها تطورات مهمة في فهمنا للجيولوجيا، بل أهداف الأبحاث الأساسية أيضاً. يبدو ربط النيزك والمجموعة الشمسية بسياق أعم – بنية المجرة – هو التطور السليم في هذه المغامرة المعرفية المتوسعة لإدراك العلاقات والترابطات بين عالمنا والكون المحيط به.

* * *

أميل إلى اعتبار البحث الذي يصفه هذا الكتاب بوصفه استمراراً لتقدير العلوم الأخرى التي حفزها عمل ألفاريز بمزجه بين الجيولوجيا والكيمياء والفيزياء. والمادة المعتمة قد تُكمل مجموعة الارتباطات المعروفة، وستعزز هذه الاستمرارية فيما بين التخصصات. ليس فقط يمكننا استخدام الجيولوجيا لفهم حادثة كونية، ولكن ربما بالفهم المُعمق لطبيعة المادة المعتمة سنصل إلى فهم الديناميكيات التي رمت المذنَّب في طريقنا في المقام الأول.

على الرغم من أن اهتمام معظم الناس بالنيازك – عدا علماء الفلك والمستثمرين في التعدين الفضائي – مستمد من عواقبها المحتملة على الحياة، الخطر المحدق بفعل هذه الأجرام الطائرة ضئيل إلى حد ما. نادراً فقط ما تنحرف أجرام كبيرة لتترك موقعها في المجموعة الشمسية أو تضرب الأرض. بالاستناد إلى المعلومات التي قدمتُها، أتمنى أن يكون لديك فهم أفضل للأجرام السماوية التي قد تضرب الأرض في المستقبل ومدى خطورة أثرها المحتمل.

شرح هذا الكتابُ الخيوط المتشابكة للدليل لإثبات مثال راسخ على مثل هذا الارتباط، ألا وهو الانقراض K-Pg قبل 66 مليون سنة. من منظور عالمي، جميعنا متحدرون من تشيكشولوب. إنها جزء من تاريخنا الذي يجب أن نرغب في فهمه. إن صح الأمر فستعني الطريقة الجديدة الإضافية التي قدمناها في هذا الكتاب أن المادة المعتمة لم تكن المسؤولة عن تغير العالم بطريقة لا رجعة فيها فحسب، بل إن المادة المعتمة أيضاً شريرة بالنهاية، والاسم الذي منحها إياه العلماء كان مناسباً لها. ولكن من وجهة نظرٍ بشرية، كان هذا النوع الجديد المقترح من المادة المعتمة هو المدبرَ لحوادث جوهرية غيرت مجرى تطور الأرض إلى الدرجة التي جعلتك تجلس هنا الآن وتقرأ هذا الكتاب.

في كتاب *المادة المعتمة والديناصورات* حاولتُ أن أعطي نكهة من طبيعة الأبحاث العلمية – كيف نثبت ما نعرفه ونتقدم إلى ما وراء العوالم المجهولة. في المقابل يأخذنا تاريخ الكون والأرض في رحلة مثيرة- ولكن جديرة بمواجهة التحدي- إلى ماضينا. إذا كنتَ تظن أن من الصعب تعقُّبَ تاريخ العائلة – حتى إن كان هناك من يخبرك الحكاية – فكِّرْ في عقبات استخراج الماضي من الصخور الجامدة، التي تعرَّض كثير منها للحت مع الزمن أو قد اندست عميقاً في وشاح الأرض، أو في مدى تعقيد فهم كيف صنعت المواد المعتمة التي لا يمكننا رؤيتها البنيةَ الكونية.

مع ذلك كشف التطور في العلم بعض الارتباطات المبهمة بين التركيب الفيزيائي للمادة الجوهرية وملامح العالم الذي نراه. انهارت جسيمات المادة المعتمة لتشكِّل المجرات، والعناصر الثقيلة التي صُنعت داخل النجوم امتُصت لتبعث الحياة، والطاقة التي أطلقها تحلُّل النوى الإشعاعية داخل وشاح الأرض دفع بحركة القشرة الأرضية التي كونت الجبال. أجد قدرتنا على التدرج في فهم هذه الترابطات الأعم في الكون واعدةً بحق. في كل مرة استكشف فيها العلماء حدودَ العالم المعروف، ظهرت اكتشافاتٌ غير مسبوقة.

عالمنا ثري – ثري جداً إلى درجة أن سؤالين من أهم الأسئلة التي يطرحها علماء الفيزياء هما: "لِمَ هذا الثراء؟"، و"كيف ترتبط كل المادة التي نراها بعضها ببعض؟". في بحثي أنا أدرك أن ما أضطلع بدراسته قد يرتبط، أو لا يرتبط، بالنتيجة بتجربتنا عن العالم من حولنا. ولكنني أتمنى، مهما كان الأمر، أن تساهم النتائج في

تطور أكثر. أنا أركز على المهمة الحالية، مدركة أن أي شيء لا يتناسب مع صورتنا القياسية وحساباتنا قد يشير إما إلى نقص في فهم النماذج التقليدية وإما يكون إشارة إلى شيء جديد.

المادة المعتمة ودورها في تطور الكون من أكثر المواضيع العلمية إثارةً حالياً. سنفهم فعلاً كل أشكال المادة – مثل أي مجتمع معقد ثقافياً – فقط عندما نعترف ونُقدر الطرق التي تساهم فيها المجاميع السكانية المتباينة معاً في إغناء بيئتنا. ستكون أفضل طريقة لنطور فهمنا هي تحديد أكثر طرق إعداد مائدة المادة موثوقيةً وأناقة والتي تتوافق مع المشاهدات الرصدية. قد يكون اقتراح المادة المعتمة الذي قدمتُه هو تجربةً فكرية في الزمن الحالي، ولكن ستثبت صحتَها المقاييسُ الفعلية المستقبلية أو تنفيها. فالبيانات والتوافق النظري هما الحكم الفصل فيما هو صائب.

التأثير التنبئي للمذنب الذي سُمِّي الكتاب بسببه ليس النتيجة الوحيدة الممكنة للنوع الجديد من المادة المعتمة التي اقترحناها. يمكن أن يؤثر قرصٌ معتم في حركة النجوم، وفي تركيب المجرات القزمة، وفي نتائج التجارب والملاحظات الرصدية في المختبرات وفي الفضاء. حتى إن كان فهم المادة المعتمة مراوغاً في عديد من جوانبه- أكثر من استكشاف الأرض والمجموعة الشمسية، فإن العلماء يجدون طرقاً مبتكرة لتعقُّبها. وستخبرنا النتائج عن تركيب مجرتنا والكون.

ربما لا يحتوي كوكبنا على الشكل الوحيد للحياة في الكون. ولكن وجودنا كان ولا يزال يتطلب كوناً وكوكباً يمتاز بعدد من الخواص المذهلة. القوى التي بدأنا من فورنا نفهمها ضروريةٌ لوصولنا إلى هنا. فهمُ المجرة وأصلِنا فيها يؤدي إلى منظور أشمل عن الأحداث السعيدة إضافةً إلى العمليات التطورية التي نحن أقدر على التنبؤ بها والتي أوصلتنا إلى هذه المرحلة. المقدار الذي ندركه حالياً رائع حقاً، وكذلك الارتباطات العديدة الأخرى التي نسعى إلى كشفها. فالتقدم في الخمسين سنة الماضية مذهل تماماً.

على الرغم من أننا كثيراً ما نواجه عناوينَ أخبار محبطة وأنماطاً دورية محبطة في أحداث العالَم، فإن المعرفة العلمية المتنامية قادرة على إغناء حياتنا وتوجيه تصرفاتنا بطرق تحفظ لنا ما نثمنه من أمور في أثناء استمرارنا في التقدم. بينما تستمر الأبحاث في الكشف عن مزيد من الجسور التي تربط حياتنا بمحيطنا وتربط حاضرنا بماضينا، علينا أن نقدِّر السمات العديدة لعالَمنا الذي ظل قيد الصنع زمناً طويلاً، وأن نحرص على استخدام الحكمة المكتسبة والتقدمات التقنية استخداماً حميداً.

أجد من المفرح دائماً أن أتذكر سياقنا الكوني المذهل. يجب ألا تُلهينا الخلافات التافهة في العالَم والمخاوف قصيرة الأمد عن النطاق الهائل لما يمكن أن يعلِّمنا إياه العلمُ عن العالَم. قد لا تبدو الكلمات التي أُوشك أن أقولها نصيحة عملية. ولكن انظر عالياً. وانظر حولك. هناك عالَم مذهل ينتظرُنا لنستثمرَه، ونُقدِّره، ونفهمَه.

الملاحظات

1. مجتمع المادة المعتمة الخفي

1. مصطلح سينمائي يستخدم للتعبير عن أفلام الجريمة والدراما.

2. على نحو أدق، اقترحت الثقوب السوداء كمرشحة محتملة عن المادة المعتمة- وهذا موضوع سنتعرض له لاحقاً. تجعل قيود الملاحظة والأمور النظرية هذا السيناريو غير مرجح.

2. اكتشاف المادة المعتمة

1. لا يمكن الإنكار أن هذا التشابه يصل إلى هذه النقطة فقط. على عكس النفي الساخط، لن تحفز العناصر الثقيلة- التي توزعت في الكون ذات مرة- اضطرابات إضافية. الأفضل من ذلك، إنها تساهم في تشكيل أنظمة نجمية وحتى في تشكيل الحياة أيضاً.

2. في الواقع، هذه الصورة- على الرغم من تقبلها على نطاق واسع- محل جدل بين الخبراء حالياً. من جهة، تتوافق التنبؤات عن منحنيات الضوء والأطياف الناجمة عن الأقزام البيضاء المنفجرة مع هذه الملاحظات بشكل جيد. ولكن من جهة أخرى، لم ير أحد الرفيق المتوقع من النجم الثنائي للأقزام البيضاء. لذلك يقترح علماء الفلك أنه من الممكن أن يكون اندماج اثنين من الأقزام البيضاء هو ما يولد الانفجار. تدعم بعض البيانات هذا الاستنتاج- معظمها له علاقة بقياس الفرق في الوقت بين تشكل الثنائي وبين الانفجار- ولكن التنبؤات المفصلة لسيناريو القزم الأبيض الواحد لم تؤكَّد بعد، لذلك تبقى المسألة من دون حل حتى الآن.).

4. بداية البداية تقريباً: مكان مناسب للبدء

1. اختلافات درجات الحرارة بوحدة كلفن تتطابق مع الاختلافات المقاسة بدرجة سيليزية، ولكن أدنى درجة حرارة ممكنة هي صفر، بدلاً من -273.15، كما هي في وحدة سيليزية، أو -459.67 كما في فهرنهايت.

7. حياة المذنب القصيرة والبراقة

1. لاحظ أن العتمة هنا تستخدم في معناها العادي في امتصاص الضوء. هذه ليست "المادة المعتمة".

قراءات إضافية

سردت أدناه جملة لبعض الأوراق العلمية والكتب التي وجدتها ممتعة ومفيدة، ولم أقصد أن تكون هذه القائمة مسحا شاملا. حررت الكثير من الموضوعات المثيرة للجدل، لكنني ضمّنت أيضا بعض المراجعات وبعض الأوراق العلمية الرئيسية. عولجت الموضوعات الأساسية أيضا في الكتب الدراسية وفي ويكيبيديا، والتي يبقيها المتحمسون المطلعون حديثة المحتوى مواكبة للعديد من الموضوعات العلمية.

الفصلين 1 و 2

1. Bergström, Lars. “Non-Baryonic Dark Matter: Observational Evidence and Detection Methods.” Reports on Progress in Physics 63.5 (2000): 793–841.

2. Bertone, Gianfranco, Dan Hooper, and Joseph Silk. “Particle Dark Matter: Evidence, Candidates and Constraints.” Physics Reports 405.5-6 (2005): 279–390.

3. Copi, C J, D N Schramm, and M S Turner. “Big-Bang Nucleosynthesis and the Baryon Density of the Universe.” Science 267.5195 (1995): 192–9.

4. Freese, Katherine. The Cosmic Cocktail: Three Parts Dark Matter. Prince ton University Press, 2014.

5. Garrett, Katherine, and Gintaras Duda. “Dark Matter: A Primer.” Advances in Astronomy 2011 (2011): 1–22.

6. Gelmini, Graciela B. TASI 2014 Lectures: The Hunt for Dark Matter. (2015). http://arxiv.org/abs/1502.01320.

7. Lundmark, Knut. Lund Medd. 1 No125 = VJS 65, p. 275 (1930). 378 SUPPLEMENTARY READING

8. Olive, Keith A. “TASI lectures on dark matter.” arXiv preprint astro-ph/030 1505(2003).

9. Panek, Richard. The 4 Percent Universe: Dark Matter, Dark Energy, and the Race to Discover the Rest of Reality: Mariner Books, 2011.

10. Peter, Annika HG. “Dark Matter: A Brief Review.” Frank N. Bash Symposium 2011: New Horizons in Astronomy. Ed. Sarah Salviander, Joel Green, and Andreas Pawlik. University of Texas at Austin, 2012.

11. Profumo, Stefano. “TASI 2012 Lectures on Astrophysical Probes of Dark Matter.” (2013): 41.

12. Rubin, V. C., N. Thonnard, and Jr. Ford, W. K. “Rotational Properties of 21 SC Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii, from NGC 4605 /R = 4kpc/ to UGC 2885 /R = 122 Kpc/.” The Astrophysical Journal 238 (1980): 471–487.

13. Rubin, Vera C., and Jr. Ford, W. Kent. “Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions.” The Astrophysical Journal 159 (1970): 379–403.

.Sahni, Varun. “Dark Matter and Dark Energy.” Physics of the Early Universe. Springer Berlin Heidelberg, 2005. 141–179 .14

.Strigari, Louis E. “Galactic Searches for Dark Matter.” Physics Reports 531.1 (2013): 1–88 .15

Trimble, V. “Existence and Nature of Dark Matter in the Universe.” Annual Review of Astronomy and Astrophysics 25 .16
.(1987): 425–472

.Zwicky, F. “Die Rotverschiebung von Extragalaktischen Nebeln.” Helvetica Physica Acta 6 (1933): 110–127 .17

.Zwicky, F. “On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae.” The Astrophysical Journal 86 (1937): 217 .18

الفصل 3

Humboldt, Alexander von. Kosmos: A General Survey of Physical Phenomena of the Universe, Volume 1. H. Baillière, .1
.1845

الفصل 4

.Baumann, Daniel. “TASI Lectures on Inflation.” (2009). http://arxiv.org/abs/0907.5424 .1

Boggess, N. W. et al. “The COBE Mission— Its Design and Performance Two Years after Launch.” The Astrophysical .2
.Journal 397 (1992): 420–429

.Freeman, Ken, and Geoff McNamara. In Search of Dark Matter. Springer, 2006 .3

.Guth, Alan H. The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins. Perseus Books, 1997 .4

Hinshaw, G. et al. “Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Data Processing, Sky Maps, and Basic .5
.Results.” The Astrophysical Journal Supplement Series 180.2 (2009): 225–245

Kamionkowski, Marc, Arthur Kosowsky, and Albert Stebbins. “A Probe of Primordial Gravity Waves and Vorticity.” Physical .6
.Review Letters 78 (1997): 2058–2061

Komatsu, E. et al. “Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation.” The .7
.Astrophysical Journal Supplement Series 180.2 (2009): 330–376

Kowalski, M. et al. “Improved Cosmological Constraints from New, Old, and Combined Supernova Data Sets.” The .8
.Astrophysical Journal 686.2 (2008): 749–778

Leitch, E. M. et al. “Degree Angular Scale Interferometer 3 Year Cosmic Microwave Background Polarization Results.” The .9
.Astrophysical Journal 624.1 (2005): 10–20

Penzias, A. A., and R. W. Wilson. “A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.” The Astrophysical .10
.Journal 142 (1965): 419–421

Seljak, Uros˘, and Matias Zaldarriaga. “Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background.” .11
.Physical Review Letters 78.11 (1997): 2054–2057

.Weinberg, Steven. The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe. Basic Books, 1993 .12

الفصل 5

.Binney, J., and S. Tremaine. Galactic Dynamics. Prince ton University Press, 2008 .1

2. Davis, M. et al. "The Evolution of Large-Scale Structure in a Universe Dominated by Cold Dark Matter." The Astrophysical Journal 292 (1985): 371–394.

3. "Hubble Maps the Cosmic Web of 'Clumpy' Dark Matter in 3-D." (7 January 2007). http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2007/01/image/a/grav/.

4. Kaehler, R., O. Hahn, and T. Abel. "A Novel Approach to Visualizing Dark Matter Simulations." IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 18.12 (2012): 2078–2087.

5. Loeb, Abraham. How Did the First Stars and Galaxies Form? Prince ton University Press, 2010.

6. Loeb, Abraham, and Steven R. Furlanetto. The First Galaxies in the Universe. Prince ton University Press, 2013.

7. Massey, Richard et al. "Dark Matter Maps Reveal Cosmic Scaffolding." Nature 445.7125 (2007): 286–90.

8. Mo, Houjun, Frank van den Bosch, and Simon White. Galaxy Formation and Evolution. Cambridge University Press, 2010.

9. Papastergis, Emmanouil et al. "A Direct Measurement of the Baryonic Mass Function of Galaxies & Implications for the Galactic Baryon Fraction." Astrophysical Journal 259.2 (2012): 138.

10. Springel, Volker et al. "Simulations of the Formation, Evolution and Clustering of Galaxies and Quasars." Nature 435.7042 (2005): 629–36.

الفصل 6

1. Blitzer, Jonathan. "The Age of Asteroids." New Yorker. (2014). http://www.newyorker.com/tech/elements/age-asteroids.

2. DeMeo, F E, and B Carry. "Solar System Evolution from Compositional Mapping of the Asteroid Belt." Nature 505 (2014): 629–34.

3. Kleine, Thorsten et al. "Hf–W Chronology of the Accretion and Early Evolution of Asteroids and Terrestrial Planets." Geochimica et Cosmochimica Acta 73.17 (2009): 5150–5188.

4. Lissauer, Jack J., and Imke de Pater. Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability. Cambridge University Press, 2013.

5. Rubin, Alan E., and Jeffrey N. Grossman. "Meteorite and Meteoroid: New Comprehensive Definitions." Meteoritics and Planetary Science (2010): 114-122.

الفصل 7

1. Bailey, M. E., and C. R. Stagg. "Cratering Constraints on the Inner Oort Cloud: Steady-State Models." Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 235.1 (1988): 1–32.

2. "Europe's Comet Chaser." European Space Agency. (2014). http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Rosetta/Europe_s_comet_chaser.

3. Gladman, B. "The Kuiper Belt and the Solar System's Comet Disk." Science 307.5706 (2005): 71–75.

4. Gladman, B., B. G. Marsden, and C. Vanlaerhoven. "Nomenclature in the Outer Solar System." The Solar System Beyond Neptune. Ed. M. A. Barucci et al. University of Arizona Press, 2008. 43–57.

5. Gomes, Rodney. "Planetary Science: Conveyed to the Kuiper Belt." Nature 426.6965 (2003): 393–5.

6. Iorio, L. “Perspectives on Effectively Constraining the Location of a Massive Trans-Plutonian Object with the New Horizons Spacecraft: A Sensitivity Analysis.” Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy 116.4 (2013): 357–366.

7. Morbidelli, A, and H F Levison. “Planetary Science: Kuiper-Belt Interlopers.” Nature 422.6927 (2003): 30–1.

8. Olson, RJM. “Much Ado about Giotto’s Comet.” Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society 35.1 (1994): 145.

9. Robinson, Howard. The Great Comet of 1680: A Study in the History of Rationalism. Press of the Northfield News, 1916.

10. Walsh, Colleen. “The Building Blocks of Planets.” Harvard Gazette 12 Sept. 2013.

الفصل 8

1. Francis, Matthew. “The Solar System Boundary and the Week in Review (September 8-14).” Bowler Hat Science. (2013). http://bowlerhatscience.org/2013/09/14/the-solar-system-boundary-and-the-week-in-review-september-8-14/.

2. McComas, David. “What Is the Edge of the Solar System Like?— NOVA Next | PBS.” (2013). http://www.pbs.org/wgbh/nova/next/space/voyager-ibex-and-the-edge-of-the-solar-system/.

الفصل 9

1. Gehrels, T., ed. Hazards Due to Comets and Asteroids. University of Arizona Press, 1995.

2. The Earth Institute, “The Growing Urbanization of the World,” Columbia University, New York, 2005.

3. “IAU Minor Planet Center.” (2015). http://www.minorplanetcenter.net/.

4. Kring, David A., and Mark Boslough. “Chelyabinsk: Portrait of an Asteroid Airburst.” Physics Today 67.9 (2014): 32–37.

5. Levison, Harold F et al. “The Mass Disruption of Oort Cloud Comets.” Science 296.5576 (2002): 2212–5.

6. Marvin, U. B. “Siena, 1794: History’s Most Consequential Meteorite Fall.” Meteoritics 30.5 (1995): 540.

7. Marvin, Ursula B. “Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) and the Origins of Modern Meteorite Research.” Meteoritics & Planetary Science 31.5 (1996): 545–588.

8. Marvin, Ursula B. “Meteorites in History: An Overview from the Renaissance to the 20th Century.” Geological Society, London, Special Publications 256.1 (2006): 15–71.

9. Marvin, Ursula B., and Mario L. Cosmo. “Domenico Troili (1766): ‘The True Cause of the Fall of a Stone in Albereto Is a Subterranean Explosion That Hurled the Stone Skyward.’ ” Meteoritics & Planetary Science 37.12 (2002): 1857–1864.

10. “Meteorites, Impacts, & Mass Extinction.” (2014). http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural_Disasters/impacts.htm.

11. National Research Council. Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies. National Academies Press, 2010.

12. Nield, Ted. Incoming! Or, Why We Should Stop Worrying and Learn to Love the Meteorite. Granta Books, 2012.

13. Shapiro, Irwin I. et al., with National Research Council. “Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies.” 2010: 149.

14. Tagliaferri, E. et al. “Analysis of the Marshall Islands Fireball of February 1, 1994.” Earth, Moon, and Planets 68.1-3 (1995): 563–572.

الفصل 10

1. “Astronomy: Collision History Written in Rock.” Nature 512.7515 (2014): 350.

2. Barringer, D. M. “Coon Mountain and Its Crater.” Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Vol. 57. 1905. 861–886.

3. “Earth Impact Database.” http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/.

4. Grieve, R A F. “Terrestrial Impact Structures.” Annual Review of Earth and Planetary Sciences 15 (1987): 245–270.

5. Kring, David A. Guidebook to the Geology of Barringer Meteorite Crater, Arizona. Lunar and Planetary Institute, 2007.

6. Tilghman, B. C. “Coon Butte, Arizona.” Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia, v. 57 (1905). 887–914.

الفصل 11

1. Bambach, Richard K. “Phanerozoic Biodiversity Mass Extinctions.” Annual Review of Earth and Planetary Sciences 34.1 (2006): 127–155.

2. Bambach, Richard K., Andrew H. Knoll, and Steve C. Wang. “Origination, Extinction, and Mass Depletions of Marine Diversity.” Paleobiology 30.4 (2004): 522–542.

3. Barnosky, Anthony D. Dodging Extinction: Power, Food, Money, and the Future of Life on Earth. University of California Press, 2014.

4. Barnosky, Anthony D et al. “Has the Earth’s Sixth Mass Extinction Already Arrived?” Nature 471 (2011): 51–57.

5. Carpenter, Kenneth. Eggs, Nests, and Baby Dinosaurs: A Look at Dinosaur Reproduction. Indiana University Press, 1999.

6. Eldredge, Niles. Reinventing Darwin: The Great Debate at the High Table of Evolutionary Theory. Wiley, 1995.

7. Jablonski, David. “Mass Extinctions and Macroevolution.” Paleobiology 31.sp5 (2005): 192–210.

8. Kelley, S. “The Geochronology of Large Igneous Provinces, Terrestrial Impact Craters, and Their Relationship to Mass Extinctions on Earth.” Journal of the Geological Society 164.5 (2007): 923–936.

9. Kidwell, Susan M. “Shell Composition Has No Net Impact on Large-Scale Evolutionary Patterns in Mollusks.” Science 307 (2005): 914–917.

10. Kolbert, Elizabeth. The Sixth Extinction: An Unnatural History. Henry Holt & Co., 2014.

11. Kurtén, Björn. Age Groups in Fossil Mammals. Helsinki: Societas scientiarum Fennica, 1953.

12. Lawton, John H., and Robert May, eds. Extinction Rates. Oxford University Press, 1995.

13. MacLeod, Norman. The Great Extinctions: What Causes Them and How They Shape Life. Firefly Books, 2013.

14. “Modern Extinction Estimates.” (2015). http://rainforests.mongabay.com/09x_table.htm.

15. Newell, Norman D. “Revolutions in the History of Life.” Geological Society of America Special Papers 89. Geological Society of America, 1967. 63–92.

16. Pimm, S. L. et al. “The Biodiversity of Species and Their Rates of Extinction, Distribution, and Protection.” Science 344 (2014): 1246752.

17. Rothman, Daniel H et al. “Methanogenic Burst in the End-Permian Carbon Cycle.” Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111.15 (2014): 5462–7.

18. Sanders, Robert. “Has the Earth’s Sixth Mass Extinction Already Arrived?” UC Berkeley News Center 2 Mar. 2011.

19. Schindel, David E. “Microstratigraphic Sampling and the Limits of Paleontologic Resolution.” Paleobiology 6.4 (1980): 408–426.

20. Sepkoski, J. J. “Phanerozoic Overview of Mass Extinction.” Patterns and Processes in the History of Life. Ed. D. M. Raup and D. Jablonski. Springer Berlin Heidelberg, 1986. 277–295.

21. Valentine, James W. “How Good Was the Fossil Record? Clues from the California Pleistocene.” Paleobiology 15.2 (1989): 83–94.

22. Wilson, Edward O. The Future of Life. 1st ed. Vintage Books, 2003.

الفصل 12

1. Alvarez, Walter. T. Rex and the Crater of Doom. Prince ton University Press, 2008.

2. Alvarez, L. W. et al. “Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction.” Science 208.4448 (1980): 1095–108.

3. Caldwell, Brady. “The K-T Event: A Terrestrial or Extraterrestrial Cause for Dinosaur Extinction?” Essay in Palaeontology (2007) 5p.

4. Choi, Charles Q. “Asteroid Impact That Killed the Dinosaurs: New Evidence.” (2013). http://www.livescience.com/26933-chicxulub-cosmic-impact-dinosaurs.html.

5. Frankel, Charles. The End of the Dinosaurs: Chicxulub Crater and Mass Extinctions. Cambridge University Press, 1999.

6. Kring, David A. et al. “Impact Lithologies and Their Emplacement in the Chicxulub Impact Crater: Initial Results from the Chicxulub Scientific Drilling Project, Yaxcopoil, Mexico.” Meteoritics & Planetary Science 39.6 (2004): 879–897.

7. Kring, David A. et al. “The Chicxulub Impact Event and Its Environmental Consequences at the Cretaceous–Tertiary Boundary.” Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 255.1-2 (2007): 4–21.

8. Moore, J. R., and M. Sharma. “The K-Pg Impactor Was Likely a High Velocity Comet.” 44th Lunar and Planetary Conference; Paper #2431. 2013.

9. Ravizza, G, and B Peucker-Ehrenbrink. “Chemostratigraphic Evidence of Deccan Volcanism from the Marine Osmium Isotope Record.” Science 302.5649 (2003): 1392–5.

10. Sanders, Robert. “New Evidence Comet or Asteroid Impact Was Last Straw for Dinosaurs.” UC Berkeley News Center 7 Feb. 2013.

11. Schulte, Peter et al. “The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary.” Science 327.5970 (2010): 1214–8.

12. “What Killed the Dinosaurs? The Great Mystery-Background.” http://www.ucmp.berkeley.edu/diapsids/extinction.html.

13. “What Killed the Dinosaurs? The Great Mystery-Invalid Hypotheses http://www.ucmp.berkeley.edu/diapsids/extincthypo.html.

14. Zahnle, K, and D Grinspoon. “Comet Dust as a Source of Amino Acids at the Cretaceous/Tertiary Boundary.” Nature 348.6297 (1990): 157–60.

الفصل 13

1. American Chemical Society. “New Evidence That Comets Deposited Building Blocks of Life on Primordial Earth.” Science Daily (2012): 27 March. www.sciencedaily.com/releases/2012/03/120327215607.htm.

2. “Astronomy: Comets Forge Organic Molecules.” Nature 512.7514 (2014): 234–235.

3. Durand-Manterola, Hector Javier, and Guadalupe Cordero-Tercero. “Assessments of the Energy, Mass and Size of the Chicxulub Impactor.” (2014). arXiv:1403:6391.

4. Elvis, Martin. “Astronomy: Cosmic Triangles and Black-Hole Masses.” Nature 515.7528 (2014): 498–499.

5. Elvis, Martin. “How Many Ore-Bearing Asteroids?” Planetary and Space Science 91 (2014): 20–26.

6. Elvis, Martin, and Thomas Esty. “How Many Assay Probes to Find One Ore-Bearing Asteroid?” Acta Astronautica 96 (2014): 227–231.

7. Knoll, Andrew H. Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth. Prince ton University Press, 2003.

8. Livio, Mario, Neill Reid, and William Sparks, eds. Astrophysics of Life: Proceedings of the Space Telescope Science Institute Symposium, Held in Baltimore, Maryland May 6–9, 2002. Cambridge University Press, 2005.

9. Melott, Adrian L., and Brian C. Thomas. “Astrophysical Ionizing Radiation and Earth: A Brief Review and Census of Intermittent Intense Sources.” Astrobiology 11.4 (2011): 343–361.

10. Poladian, Charles. “Comets Or Meteorites Crashing Into A Planet Could Produce Amino Acids, ‘Building Blocks Of Life.’ ” International Business Times 15 Sept. 2013.

11. Rothery, David A., Mark A. Sephton, and Iain Gilmour, Eds. An Introduction to Astrobiology. 2nd ed. Cambridge University Press, 2011.

12. Steigerwald, Bill. “Amino Acids in Meteorites Provide a Clue to How Life Turned Left.” 2012. http://scitechdaily.com/amino-acids-in-meteorites-provide-a-clue-to-how-life-turned-left/.

الفصل 14

1. Alvarez, Walter, and Richard A. Muller. “Evidence from Crater Ages for Periodic Impacts on the Earth.” Nature 308 (1984): 718–720.

2. Bailer-Jones, C. A. L. “Bayesian Time Series Analysis of Terrestrial Impact Cratering.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 416.2 (2011): 1163–1180.

3. Bailer-Jones, C. A. L. “Evidence for a Variation - but No Periodicity - in the Terrestrial Impact Cratering Rate.” EPSC-DPS Joint Meeting 2011 (2011): 153.

4. Bailer-Jones, C. A. L. “The Evidence for and against Astronomical Impacts on Climate Change and Mass Extinctions: A Review.” International Journal of Astrobiology 8.3 (2009): 213.

5. Chang, Heon-Young, and Hong-Kyu Moon. “Time-Series Analysis of Terrestrial Impact Crater Records.” Publications of the Astronomical Society of Japan 57.3 (2005): 487–495.

6. Connor, E. F. “Time Series Analysis of the Fossil Record.” Patterns and Processes in the History of Life. Springer Berlin Heidelberg, 1986. 119–147.

7. Feulner, Georg. “Limits to Biodiversity Cycles from a Unified Model of Mass-Extinction Events.” International Journal of Astrobiology 10.02 (2011): 123–129.

8. Fox, William T. “Harmonic Analysis of Periodic Extinctions.” Paleobiology 13.3 (1987): 257–271.

9. Grieve, R. A. F. et al. “Detecting a Periodic Signal in the Terrestrial Cratering Record.” Lunar and Planetary Science Conference (1988): 375–382.

10. Grieve, R. A. F., and D. A. Kring. “Geologic Record of Destructive Impact Events on Earth.” Comet/Asteroid Impacts and Human Society: An Interdisciplinary Approach. Ed. Peter T. Bobrowsky and Hans Rickman. Springer Berlin Heidelberg, 2007. 3–24.

11. Grieve, Richard A. F. “Terrestrial Impact: The Record in the Rocks*.” Meteoritics 26.3 (1991): 175–194.

12. Grieve, Richard A. F., and Eugene M. Shoemaker. “The Record of Past Impacts on Earth.” Hazards Due to Comets and Asteroids. Ed. T. Gehrels. University of Arizona Press, 1994. 417–462.

13. Heisler, Julia, and Scott Tremaine. “How Dating Uncertainties Affect the Detection of Periodicity in Extinctions and Craters.” Icarus 77.1 (1989): 213–219.

14. Heisler, Julia, Scott Tremaine, and Charles Alcock. “The Frequency and Intensity of Comet Showers from the Oort Cloud.” Icarus 70.2 (1987): 269–288.

15. Jetsu, L., and J. Pelt. “Spurious Periods in the Terrestrial Impact Crater Record.” Astronomy and Astrophysics 353 (2000): 409–418.

16. Lieberman, Bruce S. “Whilst This Planet Has Gone Cycling On: What Role for Periodic Astronomical Phenomena in Large-Scale Patterns in the History of Life?” Earth and Life: Global Biodiversity, Extinction Intervals and

17. Biogeographic Perturbations Through Time. Springer Netherlands, 2012. 37–50.

18. Lyytinen, J. et al. “Detection of Real Periodicity in the Terrestrial Impact Crater Record: Quantity and Quality Requirements.” Astronomy and Astrophysics 499.2 (2009): 601–613.

19. Melott, Adrian L. et al. “A ~60 Myr Periodicity Is Common to Marine-87Sr/86Sr, Fossil Biodiversity, and Large-Scale Sedimentation: What Does the Periodicity Reflect?” Journal of Geology 120 (2012): 217–226.

20. Melott, Adrian L., and Richard K. Bambach. “A Ubiquitous ~62-Myr Periodic Fluctuation Superimposed on General Trends in Fossil Biodiversity. I. Documentation.” Paleobiology 37.1 (2011): 92–112.

21. Melott, Adrian L., and Richard K. Bambach. “Analysis of Periodicity of Extinction Using the 2012 Geological Timescale.” Paleobiology 40.2 (2014): 177–196.

22. Melott, Adrian L., and Richard K. Bambach. “Do Periodicities in Extinction-with Possible Astronomical Connections - Survive a Revision of the Geological Timescale?” The Astrophysical Journal 773.1 (2013): 1–5.

23. Noma, Elliot, and Arnold L. Glass. “Mass Extinction Pattern: Result of Chance.” Geological Magazine 124.4 (1987): 319–322.

24. Quinn, James F. “On the Statistical Detection of Cycles in Extinctions in the Marine Fossil Record.” Paleobiology 13.4 (1987): 465–478.

.Raup, D. M., and J J Sepkoski. “Mass Extinctions in the Marine Fossil Record.” Science 215.4539 (1982): 1501–3 .25

Raup, D. M., and J. J. Sepkoski. “Periodicity of Extinctions in the Geologic Past.” Proceedings of the National Academy of .26
.Sciences 81.3 (1984): 801–805

.Raup, D., and J. Sepkoski. “Periodic Extinction of Families and Genera.” Science 231.4740 (1986): 833–836 .27

Stigler, S M, and M J Wagner. “A Substantial Bias in Nonparametric Tests for Periodicity in Geophysical Data.” Science .28
.238.4829 (1987): 940–5

Stothers, Richard B. “Structure and Dating Errors in the Geologic Time Scale and Periodicity in Mass Extinctions.” .29
.Geophysical Research Letters 16.2 (1989): 119–122

Stothers, Richard B. “The Period Dichotomy in Terrestrial Impact Crater Ages.” Monthly Notices of the Royal Astronomical .30
.Society 365.1 (2006): 178–180

Trefil, J.S., and D.M. Raup. “Numerical Simulations and the Problem of Periodicity in the Cratering Record.” Earth and .31
.Planetary Science Letters 82.1-2 (1987): 159–164

Yabushita, S. “A Statistical Test of Correlations and Periodicities in the Geological Records.” Celestial Mechanics and .32
.Dynamical Astronomy 69.1-2 31–48

Yabushita, S. “Are Cratering and Probably Related Geological Records Periodic?” Earth, Moon and Planets 72.1-3 (1996): .33
.343–356

Yabushita, S. “On the Periodicity Hypothesis of the Ages of Large Impact Craters.” Monthly Notices of the Royal .34
.Astronomical Society 334.2 (2002): 369–373

.Yabushita, S. “Periodicity and Decay of Craters over the Past 600 Myr.” Earth, Moon and Planets 58.1 (1992): 57–63 .35

Yabushita, S. “Statistical Tests of a Periodicity Hypothesis for Crater Formation Rate-II.” Monthly Notices of the Royal .36
.Astronomical Society 279.3 (1996): 727–732

الفصل 15

Davis, Marc, Piet Hut, and Richard A. Muller. “Extinction of Species by Periodic Comet Showers.” Nature 308.5961 (1984): .1
.715–717

Filipovic, M. D. et al. “Mass Extinction and the Structure of the Milky Way.” Serbian Astronomical Journal 87 (2013): 43– .2
.52

Grieve, Richard A. F., and Lauri J. Pesonen. “Terrestrial Impact Craters: Their Spatial and Temporal Distribution and .3
.Impacting Bodies.” Earth, Moon and Planets 72.1-3 (1996): 357–376

Heisler, Julia, Scott Tremaine, and Charles Alcock. “The Frequency and Intensity of Comet Showers from the Oort Cloud.” .4
.Icarus 70.2 (1987): 269–288

Matese, J. “Periodic Modulation of the Oort Cloud Comet Flux by the Adiabatically Changing Galactic Tide.” Icarus 116.2 .5
.(1995): 255–268

Matese, J.J., K. A. Innanen, and M. J. Valtonen. “Variable Oort Cloud Flux due to the Galactic Tide.” Collisional Processes .6
.in the Solar System. Ed

.Mikhail Marov and Hans Rickman. Kluwer Academic Publishers, 2001. 91–102 .7

8. Melott, Adrian L., and Richard K. Bambach. “Nemesis Reconsidered.”

9. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters 407.1 (2010): L99–L102.

10. Napier, W. M. “Evidence for Cometary Bombardment Episodes.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 366.3 (2006): 977–982.

11. Nurmi, P., M. J. Valtonen, and J. Q. Zheng. “Periodic Variation of Oort Cloud Flux and Cometary Impacts on the Earth and Jupiter.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 327.4 (2001): 1367–1376.

12. Rampino, M. R. “Disc Dark Matter in the Galaxy and Potential Cycles of Extraterrestrial Impacts, Mass Extinctions and Geological Events.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 448.2 (2015): 1816–1820.

13. Rampino, M. R. “Galactic Triggering of Periodic Comet Showers.” Collisional Processes in the Solar System. Ed. Mikhail Ya Marov and Hans Rickman. Kluwer Academic Publishers, 2001. 103–120.

14. Rampino, Michael, Bruce M. Haggerty, and Thomas C. Pagano. “A Unified Theory of Impact Crises and Mass Extinctions: Quantitative Tests.” Annals of the New York Academy of Sciences 822.1 (1997): 403–431.

15. Rampino, Michael R., and Richard B. Stothers. “Terrestrial Mass Extinctions, Cometary Impacts and the Sun’s Motion Perpendicular to the Galactic Plane.” Nature 308 (1984): 709–712.

16. Schwartz, Richard D., and Philip B. James. “Periodic Mass Extinctions and the Sun’s Oscillation about the Galactic Plane.” Nature 308.5961 (1984): 712–713.

17. Shoemaker, Eugene M. “Impact Cratering Through Geologic Time.” Journal of the Royal Astronomical Society of Canada 92 (1998): 297–309.

18. Smoluchowski, R., J.M. Bahcall, and M.S. Matthews. Galaxy and the Solar System. University of Arizona Press, 1986.

19. Stothers, R. B. “Galactic Disc Dark Matter, Terrestrial Impact Cratering and the Law of Large Numbers.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 300.4 (1998): 1098–1104.

20. Swindle, T. D., D. A. Kring, and J. R. Weirich. “40Ar/39Ar Ages of Impacts Involving Ordinary Chondrite Meteorites.” Geological Society, London, Special Publications 378.1 (2013): 333–347.

21. Torbett, Michael V. “Injection of Oort Cloud Comets to the Inner Solar System by Galactic Tidal Fields.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 223 (1986): 885–895.

22. Wickramasinghe, J. T., and W. M. Napier. “Impact Cratering and the Oort Cloud.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 387.1 (2008): 153–157.

23. Whitmire, Daniel P., and Albert A. Jackson. “Are Periodic Mass Extinctions Driven by a Distant Solar Companion?” Nature 308.5961 (1984): 713–715.

24. Whitmire, Daniel P., and John J. Matese. “Periodic Comet Showers and Planet X.” Nature 313.5997 (1985): 36–38.

25. Wickramasinghe, J. T., and W. M. Napier. “Impact Cratering and the Oort Cloud.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 387.1 (2008): 153–157.

الفصلين 16 و 17

1. Ahmed, Z et al. “Dark Matter Search Results from the CDMS II Experiment.” Science 327.5973 (2010): 1619–21.

2. Akerib, D. S. et al. “First Results from the LUX Dark Matter Experiment at the Sanford Underground Research Facility.” Physical Review Letters 112.9 (2014): 091303.

3. Aprile, E. et al. “First Dark Matter Results from the XENON100 Experiment.” Physical Review Letters 105.13 (2010).

4. Bergstrom, Lars. “Saas-Fee Lecture Notes: Multi-Messenger Astronomy and Dark Matter.” (2012): 105.

5. Bertone, Gianfranco. “The Moment of Truth for WIMP Dark Matter.” Nature 468.7322 (2010): 389–393.

6. Bertone, Gianfranco. Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches. Cambridge University Press, 2010.

7. Bertone, Gianfranco, and David Merritt. “Dark Matter Dynamics and Indirect Detection.” Modern Physics Letters A 20.14 (2005): 1021–1036.

8. Buckley, Matthew R., and Lisa Randall. “Xogenesis.” Journal of High Energy Physics 9 (2011).

9. Cline, David B. “The Search for Dark Matter.” Scientific American 288.3 (2003): 50–59.

10. Cohen, Timothy et al. “Asymmetric Dark Matter from a GeV Hidden Sector.” Physical Review D 82.5 (2010).

11. Cohen, Timothy, and Kathryn M. Zurek. “Leptophilic Dark Matter from the Lepton Asymmetry.” Physical Review Letters 104.10 (2010).

12. Cui, Yanou, Lisa Randall, and Brian Shuve. “A WIMPy Baryogenesis Miracle.” Journal of High Energy Physics 4 (2012): 75.

13. Cui, Yanou, Lisa Randall, and Brian Shuve. “Emergent Dark Matter, Baryon, and Lepton Numbers.” Journal of High Energy Physics 2011.8 (2011): 73.

14. Davoudiasl, Hooman et al. “Unified Origin for Baryonic Visible Matter and Antibaryonic Dark Matter.” Physical Review Letters 105.21 (2010).

15. Drukier, Andrzej K., Katherine Freese, and David N. Spergel. “Detecting cold dark-matter candidates.” Physical Review D 33.12 (1986): 3495.

16. Freeman, Ken, and Geoff McNamara. In Search of Dark Matter. Springer, 2006.

17. Gaitskell, Richard J. “Direct Detection of Dark Matter.” Annual Review of Nuclear and Particle Science 54.1 (2004): 315–359.

18. Hooper, Dan, John March-Russell, and Stephen M. West. “Asymmetric Sneutrino Dark Matter and the Omega(b) / Omega(DM) Puzzle.” Physics Letters B 605.3-4 (2005): 228–236.

19. Jungman, Gerard, Marc Kamionkowski, and Kim Griest. “Supersymmetric Dark Matter.” Physics Reports 267.5-6 (1996): 195–373.

20. Kaplan, David B. “Single Explanation for Both Baryon and Dark Matter Densities.” Physical Review Letters 68.6 (1992): 741–743.

21. Kaplan, David E., Markus A. Luty, and Kathryn M. Zurek. “Asymmetric Dark Matter.” Physical Review D 79.11 (2009).

22. Napier, W. M. “Evidence for Cometary Bombardment Episodes.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 366.3 (2006): 977–982.

23. “Neutralino Dark Matter.” http://www.picassoexperiment.ca/dm_neutralino.php.

24. Preskill, John, Mark B. Wise, and Frank Wilczek. “Cosmology of the Invisible Axion.” Physics Letters B 120.1-3 (1983): 127–132.

25. Profumo, Stefano. “TASI 2012 Lectures on Astrophysical Probes of Dark Matter.” (2013): 41.

26. Shelton, Jessie, and Kathryn M. Zurek. “Darkogenesis: A Baryon Asymmetry from the Dark Matter Sector.” Physical Review D 82.12 (2010): 123512.

27. Thomas, Scott. “Baryons and Dark Matter from the Late Decay of a Supersymmetric Condensate.” Physics Letters B 356.2-3 (1995): 256–263.

28. Turner, Michael S., and Frank Wilczek. “Inflationary Axion Cosmology.” Physical Review Letters 66.1 (1991): 5–8.

29. Weinberg, Steven. “A New Light Boson?” Physical Review Letters 40.4 (1978): 223–226.

30. Wilczek, F. “Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons.” Physical Review Letters 40.5 (1978): 279–282.

الفصل 18

1. Ackerman, Lotty et al. “Dark Matter and Dark Radiation.” Physical Review D 79.2 (2009): 023519.

2. Bovy, Jo, Hans-Walter Rix, and David W. Hogg. “The Milky Way Has No Distinct Thick Disk.” The Astrophysical Journal 751.2 (2012): 131.

3. Buckley, Matthew R., and Patrick J. Fox. “Dark Matter Self-Interactions and Light Force Carriers.” Physical Review D 81.8 (2010).

4. De Blok, W. J G. “The Core-Cusp Problem.” Advances in Astronomy (2010).

5. Faber, S. M., and R. E. Jackson. “Velocity Dispersions and Mass-to-Light Ratios for Elliptical Galaxies.” The Astrophysical Journal 204 (1976): 668–683.

6. “First Signs of Self-Interacting Dark Matter?” ESO Press Release, European Southern Observatory. http://www.eso.org/public/news/eso1514/ Goldberg, Haim, and Lawrence J. Hall. “A New Candidate for Dark Matter.” Physics Letters B 174.2 (1986): 151–155.

7. Governato, F et al. “Bulgeless Dwarf Galaxies and Dark Matter Cores from Supernova-Driven Outflows.” Nature 463.7278 (2010): 203–6.

8. Holmberg, Johan, and Chris Flynn. “The Local Surface Density of Disc Matter Mapped by Hipparcos.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 352.2 (2004): 440–446.

9. Kuijken, Konrad, and Gerard Gilmore. “The Galactic Disk Surface Mass Density and the Galactic Force K(z) at Z = 1.1 Kiloparsecs.” The Astrophysical Journal 367 (1991): L9-L13.

10. Langdale, Jonathan. “Could There Be a Larger Dark World with Dark Interactions? There Is More Dark Matter than Visible.” (2013). https://plus.google.com/+JonathanLangdale/posts/Es7M9VhiFNp.

11. Markevitch, M. et al. “Direct Constraints on the Dark Matter Self-Interaction Cross Section from the Merging Galaxy Cluster 1E 0657–56.” The Astrophysical Journal 606.2 (2004): 819–824.

12. Moore, Ben et al. “Dark Matter Substructure within Galactic Halos.” The Astrophysical Journal 524.1 (1999): L19–L22.

13. Oort, J. H. "The Force Exerted by the Stellar System in the Direction Perpendicular to the Galactic Plane and Some Related .Problems." Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands 6 (1932): 249-287

14. Oort, J. H. "Note on the determination of Kz and on the mass density near the Sun." Bulletin of the Astronomical Institutes .of the Netherlands 15 (1960): 45

15. .Read, J I. "The Local Dark Matter Density." Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 41.6 (2014): 063101

16. Salucci, Paolo, and Annamaria Borriello. "The Intriguing Distribution of Dark Matter in Galaxies." Particle Physics in the .New Millennium 616 (2003): 66–77

17. Spergel, David N., and Paul J. Steinhardt. "Observational Evidence for Self-Interacting Cold Dark Matter." Physical Review .Letters 84.17 (2000): 3760–3763

18. Weinberg, David H. et al. "Cold Dark Matter: Controversies on Small Scales." Proceedings of the National Academy of .Sciences (2015): http://arxiv.org/abs/1306.0913

19. Weniger, Christoph. "A Tentative Gamma-Ray Line from Dark Matter Annihilation at the Fermi Large Area Telescope." .Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2012.08 (2012)

20. Zhang, Lan, et al. "The gravitational potential near the sun from SEGUE K-dwarf kinematics." The Astrophysical Journal .772.2 (2013): 108

الفصل 19

1. .Cline, James M., Zuowei Liu, and Wei Xue. "Millicharged Atomic Dark Matter." Physical Review D 85.10 (2012): 101302

2. Cooper, A. P. et al. "Galactic Stellar Haloes in the CDM Model." Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 406.2 .(2010): 744–766

3. Dienes, Keith R., and Brooks Thomas. "Dynamical Dark Matter: A New Framework for Dark-Matter Physics." Workshop .on Dark Matter, Unification and Neutrino Physics: CETUP* 2012. Vol. 1534. AIP Publishing, 2013. 57–77

4. .Fan, JiJi et al. "Dark-Disk Universe." Physical Review Letters 110.21 (2013): 211302

5. .Fan, JiJi et al. "Double-Disk Dark Matter." Physics of the Dark Universe 2.3 (2013): 139–156

6. Foot, R. "Mirror Dark Matter: Cosmology, Galaxy Structure and Direct Detection." International Journal of Modern .Physics A 29.11n12 (2014): 1430013

7. Foot, R., H. Lew, and R.R. Volkas. "A Model with Fundamental Improper Spacetime Symmetries." Physics Letters B 272.1-2 .(1991): 67–70

8. .Kaplan, David E et al. "Atomic Dark Matter." Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 05 (2010). 21

9. Kaplan, David E et al. "Dark Atoms: Asymmetry and Direct Detection." Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 10 .(2011): 19

10. .Pillepich, Annalisa et al. "The Distribution of Dark Matter in the Milky Way's Disk." eprint arXiv:1308.1703 (2013)

11. Powell, Corey S. "Inside the Hunt for Dark Matter." Popular Science. (2013). http://www.popsci.com/article/science/inside-.hunt-dark-matter

12. Powell, Corey S. "The Possible Parallel Universe of Dark Matter." Discover Magazine.com. (2013). .http://discovermagazine.com/2013/julyaug/21-the-possible-parallel-universe-of-dark-matter

13. Purcell, Chris W., James S. Bullock, and Manoj Kaplinghat. “The Dark Disk of the Milky Way.” The Astrophysical Journal 703.2 (2009): 2275–2284.

14. Read, J. I. et al. “Thin, Thick and Dark Discs in ËCDM.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 389.3 (2008): 1041–1057.

15. Rosen, Len. “Is There Only One Type of Dark Matter?” (2013). http://www.21stcentech.com/type-dark-matter/.

الفصل 20

1. Bovy, Jo, and Hans-Walter Rix. “A Direct Dynamical Measurement of the Milky Way’s Disk Surface Density Profile, Disk Scale Length, and Dark Matter Profile at 4 Kpc <~ R <~ 9 Kpc.” The Astrophysical Journal 779.2 (2013): 1–30.

2. Bovy, Jo, and Scott Tremaine. “On the Local Dark Matter Density.” The Astrophysical Journal 756.1 (2012): 89.

3. Bruch, Tobias et al. “Dark Matter Disc Enhanced Neutrino Fluxes from the Sun and Earth.” Physics Letters B 674.4-5 (2009): 250–256.

4. Bruch, Tobias et al. “Detecting the Milky Way’s Dark Disk.” The Astrophysical Journal 696.1 (2009): 920–923.

5. Buckley, Matthew R. et al. “Scattering, Damping, and Acoustic Oscillations: Simulating the Structure of Dark Matter Halos with Relativistic Force Carriers.” Physical Review D 90.4 (2014): 043524.

6. Cartlidge, Edwin. “Do Dark-Matter Discs Envelop Galaxies?” PhysicsWorld.com. (2013). http://physicsworld.com/cws/article/news/2013/jun/03/do-dark-matter-discs-envelop-galaxies.

7. Cyr-Racine, Francis-Yan et al. “Constraints on Large-Scale Dark AcousticOscillations from Cosmology.” Physical Review D 89.6 (2014).

8. Cyr-Racine, Francis-Yan, and Kris Sigurdson. “Cosmology of Atomic Dark Matter.” Physical Review D 87.10 (2013).

9. Holmberg, J, and C Flynn. “The Local Density of Matter Mapped by Hipparcos.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 313.2 (2000): 209–216.

10. Kuijken, K., and G. Gilmore. “The Mass Distribution in the Galactic Disc - II - Determination of the Surface Mass Density of the Galactic Disc Near the Sun.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 239 (1989): 605–649.

11. Kuijken, Konrad, and Gerard Gilmore. “The Mass Distribution in the Galactic Disc. I - A Technique to Determine the Integral Surface Mass Density of the Disc near the Sun.” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 239 (1989): 571–603.

12. March-Russell, John, Christopher McCabe, and Matthew McCullough. “Inelastic Dark Matter, Non-Standard Halos and the DAMA/LIBRA Results.” Journal of High Energy Physics 2009.05 (2009).

13. McCullough, Matthew, and Lisa Randall. “Exothermic Double-Disk Dark Matter.” Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2013.10 (2013): 58.

14. Motl, Luboš. “Exothermic Double-Disk Dark Matter.” (2013). http://motls.blogspot.com/2013/07/exothermic-double-disk-dark-matter.html.

15. Nesti, Fabrizio, and Paolo Salucci. “The Dark Matter Halo of the Milky Way, AD 2013.” Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2013.07 (2013): 16.

16. Randall, Lisa, and Jakub Scholtz. “Dissipative Dark Matter and the Andromeda Plane of Satellites.” (2014). http://arxiv.org/abs/1412.1839.

.Rix, Hans-Walter, and Jo Bovy. “The Milky Way’s Stellar Disk.” The Astronomy and Astrophysics Review 21.1 (2013): 61 .17

الفصل 21

Aron, Jacob. “Did Dark Matter Kill the Dinosaurs? Maybe. . . .” New Scientist. (2014). .1
.http://www.newscientist.com/article/dn25177-did-dark-matter-kill-the-dinosaurs-maybe.html#.VVYlfvlVhBc

Choi, Charles Q. “Dark Matter Could Send Asteroids Crashing Into Earth: New Theory.” (2014). .2
http://www.space.com/25657-dark-matter-asteroid-impacts-earth-theory.html

Gibney, Elizabeth. “Did Dark Matter Kill the Dinosaurs?” Nature. (2014). http://www.nature.com/news/did-dark-matter- .3
.kill-the-dinosaurs-1.14839

.Nagai, Daisuke. “Viewpoint: Dark Matter May Play Role in Extinctions.” Physical Review Letters Physics 7 (2014): 41 .4

Nair, Unni K. “Dinosaurs Extinction from Dark Matter?” (2014). http://guardianlv.com/2014/03/dinosaurs-extinction-from- .5
./dark-matter

Piggott, Mark. “Were Dinosaurs Killed by Disc of Dark Matter?” (2014). http://www.ibtimes.co.uk/were-dinosaurs-killed- .6
.by-disc-dark-matter-1439500

Randall, Lisa, and Matthew Reece. “Dark Matter as a Trigger for Periodic Comet Impacts.” Physical Review Letters 112.16 .7
.(2014): 161301

Sharwood, Simon. “Dark Matter Killed the Dinosaurs, Boffins Suggest” The Register. 5 Mar. 2014. .8
./http://www.theregister.co.uk/2014/03/05/dark_matter_killed_the_dinosaurs_boffins_suggest

الخاتمة

Bettencourt, Luís M A et al. “Growth, Innovation, Scaling, and the Pace of Life in Cities.” Proceedings of the National .1
.Academy of Sciences of the United States of America 104.17 (2007): 7301–6

Brynjolfsson, Erik, and Andrew McAfee. The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant .2
.Technologies. W. W. Norton, 2014

.Geoffrey West.” (2015). http://www.santafe.edu/about/people/profile/Geoffrey%20West“ .3

On Care for Our Common Home.” Encyclical Letter Laudato Si’ of the Holy Father Francis (2015).“ .4
.http://w2.vatican.va/content/francesco/en/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html

.Weisman, Alan. The World Without Us. Reprint Edition. Picador, 2008 .5

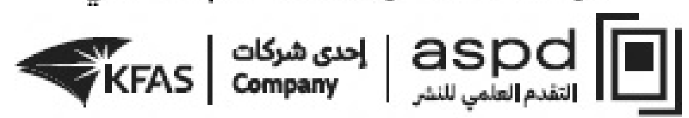
West, Geoffrey. “Why Cities Keep Growing, Corporations and People Always Die, and Life Gets Faster.” The Edge. (2011). .6
.http://edge.org/conversation/geoffrey-west

فريق التقدم العلمي للنشر والتوزيع

رئيس مجلس الإدارة

د. سلام العبلاني

مؤسســـة الكـويت للتقـــدم العـــلمي



الكويت - الطبعة الأولى 2021

المادة المعتمة والديناصورات

الترابط المذهل في الكون

يشرح هذا الكتاب معرفتنا الحالية بالكون، ومجرة درب التبانة، والمجموعة الشمسية، إضافة إلى ما قد يكون موئلا، والحياة على الأرض. ويناقش الكتاب أيضا المادة المعتمة والكون، مع الغوص أيضاً في الكتابة عن المذنبات والكويكبات ونشوء الحياة وانقراضها، بتركيز خاص على المواد التي سقطت على الأرض فقتلت الديناصورات الأرضية - والكثير مما بقي من معالم الحياة. يكمن الغرض من تأليف هذا الكتاب في محاولة نقل مَواطِن الترابط المدهشة الكثيرة التي أوصلتنا إلى هنا؛ حتى نفهم ما يجري الآن فهما أعمق. عندما نفكر في كوكبنا اليوم، ربما نريد أن نفهم أكثر السياق الذي تطور فيه أيضاً، ونتطلع إلى معرفة أكثر شمولا لكوننا الغامض.

